



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Grado

CURSO 2020/21

*ESTUDIO CONCEPTUAL TÉRMICO Y ACÚSTICO DE
MATERIALES PARA USO COMO NÚCLEO DE
MAMPAROS TIPO SÁNDWICH PARA LA
CONSTRUCCIÓN NAVAL*

Grado en Ingeniería Naval y Oceánica

ALUMNA/O

Marta Cabaleiro Figueroa

TUTORAS/ES

Ana Álvarez García

Ramón Pedro Artiaga Díaz

FECHA

Septiembre 2021

ÍNDICE

Lista de figuras	3
Lista de tablas	5
Lista de símbolos	6
Resumen.....	7
1 Introducción.....	8
1.1 Motivación y definición del problema	8
2 Estudio acústico.....	10
2.1 Base teórica del diseño	11
2.2 Diseño del prototipo	15
2.3 Validación del prototipo	20
2.4 Resultados	20
3 Estudio térmico	25
3.1 Ensayo Termogravimétrico (TGA)	25
3.1.1 Base teórica	25
3.1.2 Ensayos	29
3.1.3 Resultados	31
3.2 Ensayo de propagación al fuego	34
3.2.1 Base teórica	34
3.2.2 Prototipo.....	36
3.2.3 Resultados	40
4 Conclusiones.....	48
Agradecimientos.....	50
Bibliografía	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comportamiento de una onda.

Figura 2: Esquema del aparato diseñado de onda estacionaria.

Figura 3: Representación gráfica de la presión máxima y mínima en un aparato de onda estacionaria.

Figura 4: Materiales del aparato de onda estacionaria.

Figura 5: Equipos del aparato de onda estacionaria.

Figura 6: Muestra en detalle la configuración del carro.

Figura 7: Detalle de la regla graduada.

Figura 8: Aparato de onda estacionaria.

Figura 9: Pasos seguidos durante el proceso de montaje de las probetas.

Figura 10: Representación gráfica de los resultados, núcleo desnudo.

Figura 11: Representación gráfica de los resultados, núcleo con una chapa.

Figura 12: Representación gráfica de los resultados, mamparo.

Figura 13: Representación gráfica de la comparación de resultados.

Figura 14: *TA instruments sdt-2960 simultaneous DSC-TGA.*

Figura 15: Esquema SDT-2960.

Figura 16: Sistema de regulación de gas.

Figura 17: Balanza analítica

Figura 18: Principales tipos de curvas termogravimétricas.

Figura 19: Colocación de las cápsulas en su posición de trabajo.

Figura 20: Curvas TG y DTG correspondientes a la descomposición térmica de los núcleos.

Figura 21: Curvas TG y DTG correspondientes a la descomposición térmica del Airex.

Figura 22: Curvas TG y DTG correspondientes a la descomposición térmica del FireMaster.

Figura 23: Curvas TG y DTG correspondientes a la descomposición térmica de la Fibra Cerámica.

Figura 24: Curvas TG y DTG correspondientes a la descomposición térmica de la Lana de Roca.

Figura 25: Cámara de propagación de la llama.

Figura 26: Campana Extractora.

Figura 27: Tipos de llama.

Figura 28: Temperaturas de la llama.

Figura 29: Ensayo al fuego.

Figura 30: Termómetro digital.

Figura 31: Cámara termográfica.

Figura 32: Programa de análisis térmico.

Figura 33: Mediciones FireMaster ensayo al fuego.

Figura 34: Termografía FireMaster ensayo al fuego

Figura 35: Mediciones Fibra Cerámica ensayo al fuego.

Figura 36: Termografía Fibra Cerámica ensayo al fuego.

Figura 37: Mediciones Lana de Roca ensayo al fuego.

Figura 38: Termografía Lana de Roca ensayo al fuego.

Figura 39: Probeta de Airex, ensayo al fuego.

Figura 40: Comparación entre los diferentes núcleos.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características principales de los núcleos.

Tabla 2: Comprobación del prototipo.

Tabla 3: Resultados coeficiente de absorción, núcleo desnudo.

Tabla 4: Resultados coeficiente de absorción, núcleo con una chapa.

Tabla 5: Resultados coeficiente de absorción, mamparo.

Tabla 6: comparación de resultados.

Tabla 7: Mediciones FireMaster ensayo al fuego.

Tabla 8: Mediciones Fibra Cerámica ensayo al fuego.

Tabla 9: Mediciones Lana de Roca ensayo al fuego.

LISTA DE SÍMBOLOS

α - coeficiente de absorción.

λ - longitud de onda (m).

D - el diámetro del tubo (m).

c_0 - velocidad del sonido (m/s).

f - frecuencia de la señal acústica (Hz).

f_1 - frecuencia mínima (Hz).

f_u - frecuencia máxima (Hz).

l - longitud del tubo (m).

$P_{incidente}$ - Presión incidente.

$P_{reflejada}$ - Presión reflejada.

r - coeficiente de reflexión.

y - distancia al punto observado desde la superficie de la muestra (m).

t - tiempo (s).

n - rango de onda estacionaria.

Z - Impedancia acústica.

Δ - desfase de la presión sonora incidente.

RESUMEN

El sector de la construcción naval es un sector estratégico en Galicia, que busca diferenciarse del resto del mundo aportando ideas innovadoras y disruptivas. Para alcanzar este concepto de innovación, se va a intentar aportar un pequeño grano de arena. En este trabajo se estudian térmica y acústicamente unas configuraciones de mamparos tipo sándwich diseñados con el objetivo de mejorar el aislamiento acústico, reducir el peso del buque y, por tanto, el consumo de combustible y la contaminación que se emite a la atmósfera. Para el estudio acústico se ha diseñado y fabricado un aparato de onda estacionaria con el que se determina el coeficiente de absorción. Para el estudio térmico se realizan dos análisis, uno termogravimétrico y otro de comportamiento al fuego. Además, con el objeto de cumplir los requerimientos al fuego específicos para el sector naval se ha creado una cámara de propagación de llama.

RESUMO

O sector da construción naval é un sector estratéxico en Galicia, que busca diferenciarse do resto do mundo aportando ideas innovadoras e disruptivas. Para acadar este concepto de innovación, intentaremos aportar un pequeno gran de area. Neste traballo, estudamos térmica e acústicamente algunhas configuracións de mamparas tipo sándwich deseñadas co obxectivo de mellorar o illamento acústico, reducir o peso do buque e, polo tanto, o consumo de combustible e a contaminación que se emite á atmosfera. Para o estudo acústico deseñouse e fabricouse un aparello de ondas estacionarias co que se determina o coeficiente de absorción. Para o estudo térmico realízanse dúas análises, unha termogravimétrica e outra de comportamento ao lume. Ademais, para cumprir os requisitos específicos de incendios para o sector naval, creouse unha cámara de propagación da chama.

ABSTRACT

The shipbuilding sector is a strategic sector in Galicia, which seeks to differentiate itself from the rest of the world by providing innovative and disruptive ideas. To achieve this concept of innovation, we are going to try to contribute a small grain of sand. In this work, we study thermally and acoustically some sandwich-type bulkhead configurations designed with the aim of improving acoustic isolation, reducing the weight of the ship and, therefore, fuel consumption and the pollution that is emitted into the atmosphere. For the acoustic study, a standing wave apparatus has been designed and manufactured with which the absorption coefficient is determined. For the thermal study, two analyzes are carried out, one thermogravimetric and the other of behavior to fire. In addition, in order to meet the specific fire requirements for the naval sector, a flame propagation chamber has been created.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación y definición del problema

En las últimas décadas, los paneles sándwich han proporcionado nuevas soluciones y alternativas económicas, fiables y versátiles [1]. Existen una gran diversidad de paneles, que se presentan con multitud de superficies perfiladas, diferentes acabados, colores, núcleos e incluso revestimientos metálicos.

Una de las principales características de los paneles sándwich es su función como material aislante térmico. Durante los últimos años, la innovación ha venido de la mano de la utilización de la lana de roca como núcleo de los paneles. Este material aparte de ser un aislante térmico aporta aislamiento acústico y protección contra incendios.

En la actualidad, en los buques se emplean mamparos cuyo núcleo principal es lana de roca. La chapa empleada es acero de 1,5mm. Sin embargo, el sector naval está preocupado tanto por la emisión de contaminantes como por el consumo de combustible. Un factor que puede ayudar a mitigar ambos problemas es el uso de materiales más ligeros que reduzcan el peso del buque.

Los mamparos que se están utilizando presentan la siguiente configuración: chapa, lana de roca y chapa. Para reducir el peso del buque se considera que una buena opción sería diseñar mamparos en los que utilicen materiales innovadores que permitan reducir su espesor y que a su vez proporcionen mejores prestaciones. Para ello, los mamparos deben cumplir una serie de normas acústicas y térmicas.

El objetivo es doble, por una parte, se introducen materiales para el núcleo novedosos y por otra, se efectúan dos estudios uno térmico en el que se observa el comportamiento del mamparo ante un incendio y frente a altas temperaturas, y un estudio acústico en el que se determina el coeficiente de absorción.

Estos materiales, se han conseguido por diferentes vías. La Lana de Roca, que es el material que se utiliza con más asiduidad en el buque, se ha extraído unas muestras reales. La espuma de poliuretano, en adelante Airex, y la fibra de vidrio, en adelante FireMaster, han sido un regalo de las casas 3ACore Composites Materials y Morgan Advanced Materials y, por último, la fibra cerámica se ha comprado. En la Tabla 1 se indican las características principales de los núcleos que se van a analizar.

	Espesor (mm)	Densidad (kg/m³)	Propiedades al Fuego
Lana de Roca	50	150	No combustible
Fire Master	50	80	No combustible
Airex	50	65	-
Fibra Cerámica	25	64	No combustible

Tabla 1. Características principales de los núcleos

2 ESTUDIO ACÚSTICO

El ruido a bordo de los barcos es un problema tanto para el pasaje como para la tripulación [2]. El confort acústico es un aspecto muy importante sobre todo en los buques pasaje ya que altos niveles de ruido pueden producir enfado e insatisfacción en el pasaje y esto puede generar grandes pérdidas económicas para el armador.

Por otra parte, no solo es un factor a tener en cuenta en los buques de pasaje ya que, si nos fijamos en la tripulación de cualquier tipo de buque, estas se ven expuestas a altos niveles de ruido y a vibraciones continuas durante un largo periodo de tiempo. Esta exposición puede afectar al rendimiento de la tripulación, perturbar las horas de sueño e incluso llegar a causar daños irreversibles. Por estos motivos es muy importante que el núcleo que conforme el panel sándwich sea un buen aislante acústico.

Para poder caracterizar los materiales acústicamente, es necesario conocer la resistencia específica del flujo. Para determinar este parámetro existen normativas internacionales [3], y, además, para materiales acústicamente absorbentes, existe una alternativa a esta normativa muy extendida en el ámbito de la investigación [4]. Esta alternativa se basa en tomar mediciones en un aparato de onda estacionaria para obtener el coeficiente de absorción en incidencia normal [5].

Se puede definir el coeficiente de absorción (α) como el cociente entre la energía acústica absorbida por la superficie de la muestra y la energía incidente [6]. Gracias al coeficiente de absorción conseguimos medir la capacidad de absorción acústica que tiene un material.

Por ejemplo, si un material tiene un coeficiente de absorción de 0,5 eso significa que absorbe el 50% de la onda incidente y el otro 50% se refleja (ver figura 1). Si $\alpha=1$, significa que el material absorbe toda la energía, pero si es 0, indica que toda la energía es reflejada.

En la Escuela Politécnica superior de Ferrol se ha diseñado un aparato de onda estacionaria para calcular el coeficiente de absorción de los núcleos. El diseño y el montaje de este se han realizado en base a la bibliografía referenciada anteriormente.

En este estudio se muestra el diseño y montaje del prototipo junto con los resultados obtenidos en el análisis de cada mamparo.

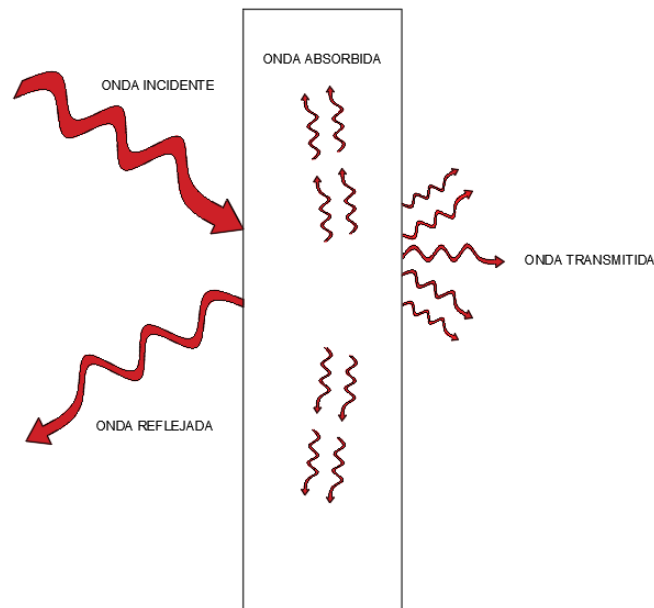


Figura 1: Comportamiento de una onda.

2.1 Base teórica del diseño

En la figura 2 se presenta el diseño del prototipo que se ha diseñado siguiendo la UNE-EN ISO10534-1 [3] y diversos artículos de referencia [6 y 7], este dispositivo está formado por un tubo, el cual en un extremo lleva una tapa ciega en la cual se dispone la probeta a estudiar y el otro la tapa está provista por dos orificios. El orificio superior queda totalmente tapado por el altavoz, permitiendo sacar los cables sin tener que perforar la tapa, mientras que el orificio inferior permite el paso de un carrito el cual lleva en su extremo un micrófono que funciona como receptor de las ondas emitidas por el altavoz.

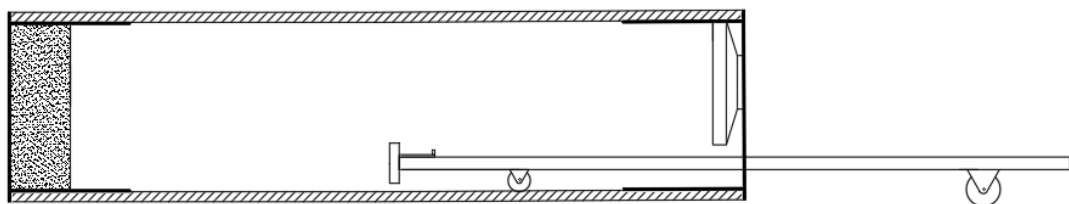


Figura 2: Esquema del aparato diseñado de onda estacionaria.

Para obtener el coeficiente de absorción se empleará un aparato de onda estacionaria que se basa en el modelo del Tubo de Kundt, que fue el más célebre experimento del científico alemán August Kund, publicado en 1866 [8]. Este instrumento se utilizó para el estudio de las ondas estacionarias y posteriormente para obtener la velocidad de las ondas sonoras en distintos gases.

Aunque este método ha seguido desarrollando, el aparato de onda estacionaria sigue presentado algunas limitaciones que se deben tener en cuenta.

Para poder realizar las mediciones, el diámetro del tubo debe cumplir que $\lambda > 1,7D$, siendo λ la longitud de onda y D el diámetro del tubo, par que existan ondas de sonido planas [6].

Adicionalmente, el intervalo de frecuencias de trabajo está determinado por su longitud y su sección recta. Para poder entender bien esto es necesario definir previamente la longitud de onda.

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \quad (1)$$

c_0 = velocidad del sonido que es una constante cuyo valor es 343,3 m/s.

f = frecuencia de la señal acústica (Hz).

Una vez determinada la longitud de onda, se puede determinar la frecuencia mínima y la frecuencia máxima que admite el tubo de impedancia que se ha diseñado.

La frecuencia mínima (f_1) es:

$$l \geq \frac{250}{f+3D} \quad (2)$$

Siendo:

$$l \geq \frac{3\lambda_0}{4} \quad (3)$$

y para tubos de sección circular, la frecuencia máxima(f_u) es:

$$f_u \cdot D \leq 200 \quad (4)$$

Por otro lado, el tubo también está limitado la necesidad de que su diámetro sea menor de $0,586\lambda$ para evitar que exista la posibilidad de producirse una primera resonancia transversal. Las resonancias transversales no se pueden permitir, ya que suponemos un campo de sonido plano y estas darían lugar a una presión variable en la dirección transversal del aparato de onda estacionaria.

Como se puede observar en la figura 3, la onda acústica que incide en la probeta, esta es producida por un altavoz que se encuentra en el otro extremo del tubo. La onda incidente y la onda reflejada se superponen, produciendo un sistema de ondas estacionarias, suponiendo que las ondas acústicas se propagan en el tubo sin atenuación.

La presión incidente y la presión reflejada en un punto vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

$$P_{incidente} = A \cos 2\pi f t \quad (5)$$

$$P_{reflejada} = B \cos 2\pi f \left(t - \frac{2y}{c_0}\right) \quad (6)$$

Siendo:

- f la frecuencia de excitación.
- y la distancia al punto observado desde la superficie de la muestra en metros.
- c_0 la velocidad del sonido
- t el tiempo en segundos.

La presión del sonido sería la suma de ambas, por lo tanto, será:

$$P_{total} = P_{incidente} + P_{reflejada} = A \cos 2\pi f t + B \cos 2\pi f \left(t - \frac{2y}{c_0}\right) \quad (7)$$

Si aplicamos el Teorema de adición al termino final de la ecuación anterior:

$$\cos(\theta - \varphi) = \cos \theta \cdot \cos \varphi + \sin \theta \cdot \sin \varphi \quad (8)$$

Se observa que la presión en $(A+B) \cos 2\pi f t$ es máxima cuando $y=\lambda/2$ y mientras que en $(A-B) \cos 2\pi f t$ se producirá un mínimo cuando $y=\lambda/4$.

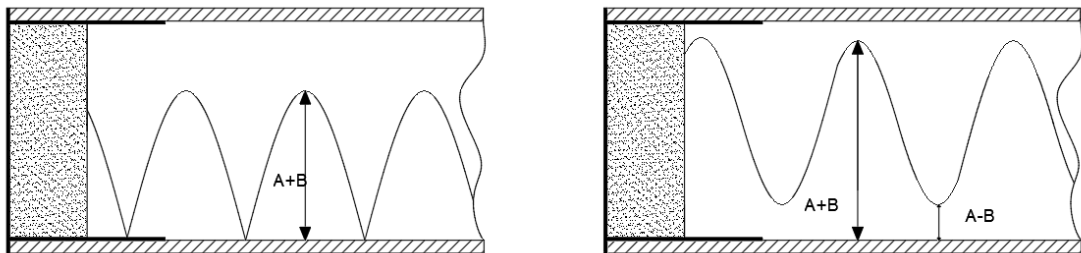


Figura 3: Representación gráfica de la presión máxima y mínima en un aparato de onda estacionaria.

Como ya se ha dicho, se define el coeficiente de absorción (α) como el cociente entre la energía acústica absorbida por la superficie de la muestra y la energía incidente o lo que es lo mismo:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{B}{A}\right)^2 \quad (9)$$

También se puede definir como:

$$\alpha = 1 - r^2 \quad (10)$$

Siendo r el coeficiente de reflexión de la onda:

$$r = \frac{B}{A} \quad (11)$$

El rango de onda estacionaria, n , es fácil de medir con el aparato de onda estacionaria que se ha diseñado puesto que es el cociente entre la presión máxima y la presión mínima.

$$n = \frac{P_{\text{máx}}}{P_{\text{mín}}} = \frac{A+B}{A-B} \quad (12)$$

O lo que es lo mismo,

$$r = \frac{B}{A} = \frac{n-1}{n+1} \quad (13)$$

Por tanto,

$$\alpha = 1 - \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \quad (14)$$

Aparte del coeficiente de absorción, también se calculará la impedancia [2] [5], para ello partimos del cálculo de α .

$$n = \frac{P_{\text{máx}}}{P_{\text{mín}}} \quad (15)$$

$$\alpha = 1 - \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \quad (16)$$

A diferencia de la luz, una onda no se refleja directamente sobre la superficie de la muestra incidente, sino que penetra una cierta distancia y la reflexión se produce dentro de la muestra. El comportamiento de la onda se puede caracterizar por la impedancia acústica (Z) que se define como el cociente entre la presión acústica y la velocidad de las partículas en la superficie del material. Puede suceder que la presión del sonido y la velocidad de la partícula no estén en fase, por lo que la impedancia acústica puede llegar a ser compleja, escribiéndose como la suma de partes reales e imaginarias correspondientes a las componentes resistivas y reactivas.

$$Z = (Re(Z)) + j(Im(Z))\rho c_0 \quad (17)$$

Donde:

$$Re(Z) = \frac{1-r^2}{1+r^2-2r \cos \Delta} \quad (18)$$

$$Im(Z) = \frac{2r \cos \Delta}{1+r^2-2r \cos \Delta} \quad (19)$$

Siendo Δ el desfase de la presión sonora incidente.

$$\Delta = \left(\frac{2y_1}{y_2 - y_1} - 1 \right) \pi \quad (20)$$

Podemos despejar y_2 de:

$$y_2 - y_1 = \frac{\lambda}{2} \quad (21)$$

2.2 Diseño del prototipo

El prototipo se ha fabricado con los diferentes materiales que se puede observar en la figura 4. Todos estos equipos y materiales conforman el aparato de onda estacionaria (ver figura 5-8).

Micrófono

El micrófono irá colocado en el extremo de la barra que se encontrará dentro del tubo de pvc. Es el encargado de recibir las ondas.



Altavoz

Altavoz de 32Ω de impedancia. Es el emisor de la onda estacionaria. Se encuentra en uno de los extremos del tubo. Debe cubrir 2/3 partes del área de la sección del tubo



Ruedas

Se dispone de dos ruedas, una un poco más grande que la otra ya que la pequeña se deslizará por la pared del tubo y la otra encima de una mesa, por lo que se decide instalar la rueda exterior un poco más grande porque hay que tener en cuenta el grosor del tubo.



Barra de madera

Esta barra actuará de carrito.

**Cinta métrica adhesiva**

En el lateral de la barra se pegará esta cinta adhesiva que nos permitirá saber la posición y1.

**Amplificador**

El amplificador de onda aumenta la señal recibida por el micrófono para poder visionarla con claridad en el osciloscopio.

**Tubo de PVC**

Tubo de 10mm de diámetro

**Tapa ciega**

En ella se alberga el núcleo y nos proporciona la estanqueidad que necesitamos.

**Tapa perforada**

El agujero de la tapa nos permite meter el altavoz y poder sacar los cables de este sin que interfieran con los cables del micrófono.



Figura 4: Materiales del aparato de onda estacionaria.

Osciloscopio

Permite visualizar de forma gráfica la señal eléctrica que recibe el micrófono, aportando de manera automática los valores pico, máximos y mínimos de la señal.

**Generador de Ondas**

Este nos permite emitir señales a la frecuencia deseada por el usuario.



Figura 5: Equipos del aparato de onda estacionaria.

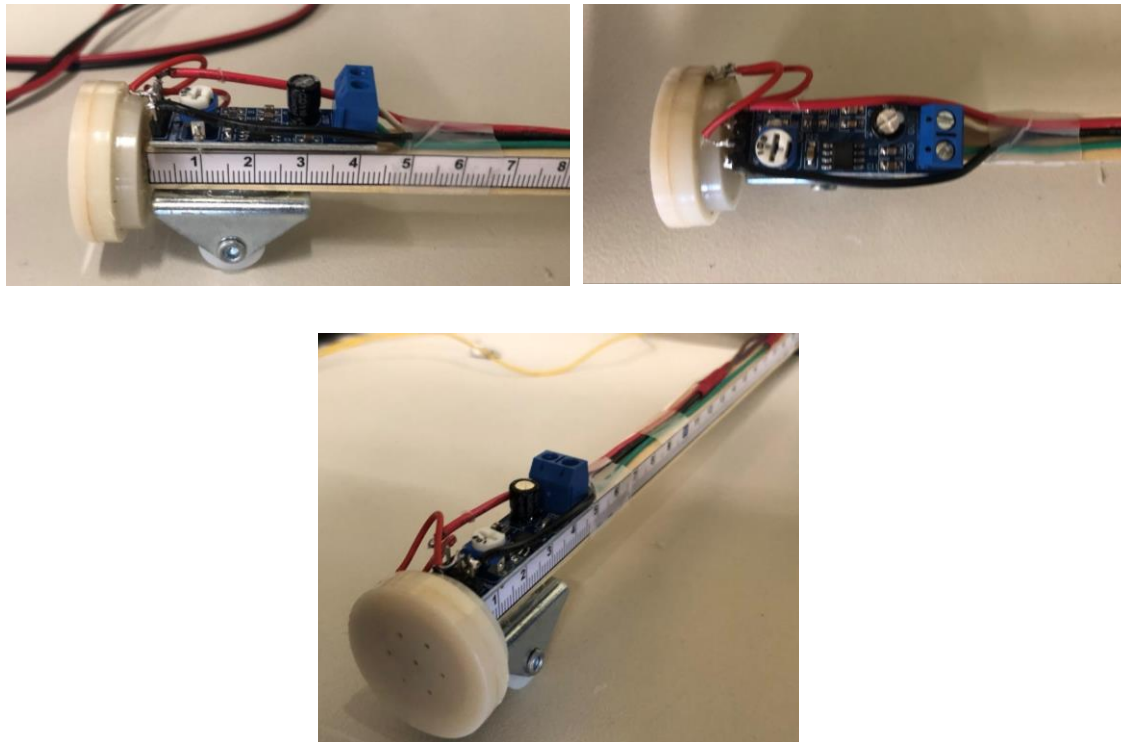


Figura 6: Muestra en detalle la configuración del carro.

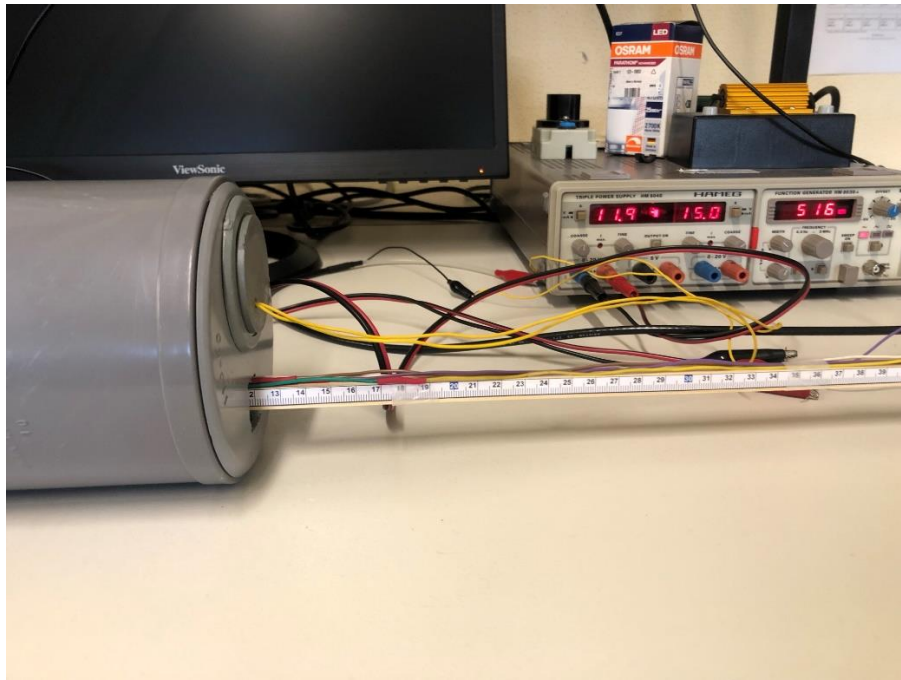


Figura 7: Detalle de la regla graduada.

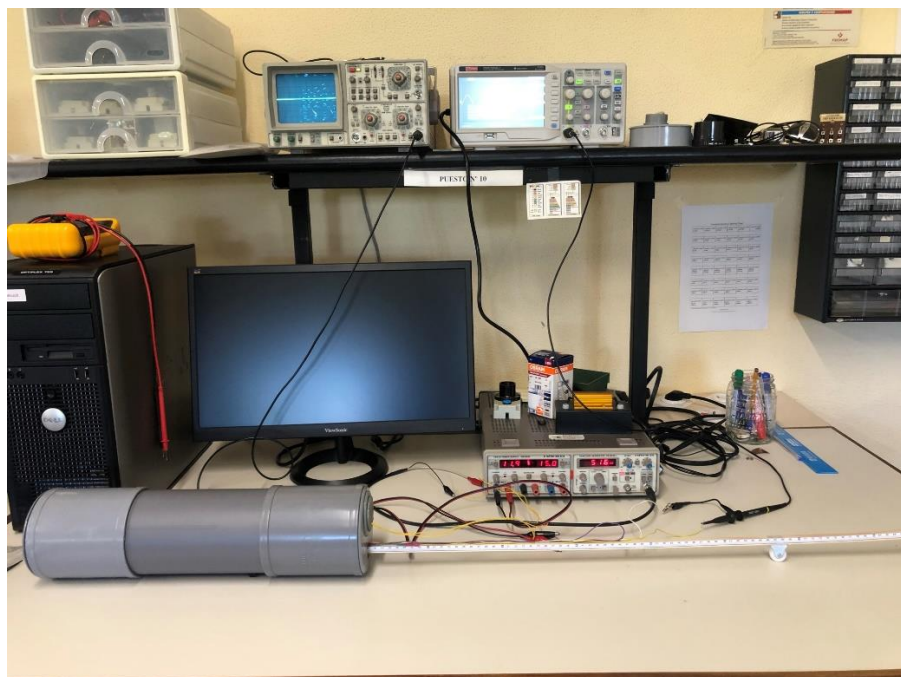


Figura 8: Aparato de onda estacionaria.

A demás de diseñar y crear el prototipo, también fue necesario fabricar las probetas a ensayar. Para construir las probetas se cortaron chapas circulares de 100mm de diámetro de acero de 1,5 mm. Una vez que están cortadas se procede a su limpieza. Para quitar los residuos de lana de roca se usa un secador de alta temperatura.

Estas chapas provienen de mamparos reales que se utilizan en los buques para conseguir que las probetas se ajusten lo máximo posible a la realidad.

Cuando se elimina la lana de roca de las chapas se procede a retirar el adhesivo con el que viene pegados los mamparos. Para ello se usa acetona pura, la cual se rocía en cada chapa y se deja actuar para que el adhesivo se ablande y sea más fácil quitarlo con ayuda de una rasqueta, dejando así la chapa totalmente limpia. Finalizados estos procesos se dejan secar y se recorta el núcleo para cada probeta, ver figura 9. El proceso de corte consiste en primer lugar en marcar las piezas sobre la plancha. Una vez marcadas se sujetan a la mesa mediante sargentos y con mucho cuidado se corta con la sierra de calar, que lleva una sierra especial para cortar metales.

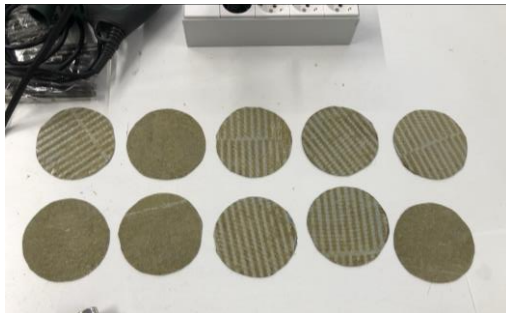
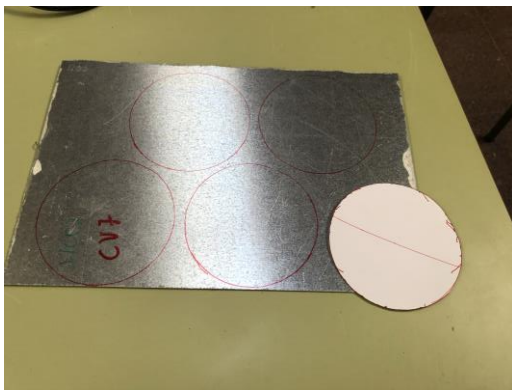


Figura 9: Pasos seguidos durante el proceso de montaje de las probetas.

2.3 Validación del prototipo

Una vez creado el aparato de onda estacionaria se procede a validar su funcionalidad. Para realizar esta validación se usa la probeta de FireMaster con una chapa puesto que la ficha técnica del material proporciona el coeficiente de absorción a diferentes frecuencias.

En la tabla 2 se observan los resultados obtenidos en las mediciones a diferentes frecuencias y el coeficiente de absorción para esa probeta y justo al lado los resultados obtenidos de la ficha técnica del material. La frecuencia mínima que registra este aparato de onda estacionaria es de 500Hz y la máxima de 2000 Hz ajustándose a los resultados que se obtendrían al realizar los cálculos y teniendo en cuenta la longitud del tubo.

Muestra	Frecuencia	Voltaje (mV)		n	α (Medición)	α (Catálogo)	% Coef. Variación
FireMaster Marine Plus blanket	125	Vmín	32	0,75	0,98	0,3	75%
		Vmáx	24				
	250	Vmín	32	0,75	0,98	0,83	12%
		Vmáx	24				
	500	Vmín	440	0,45	0,86	0,87	1%
		Vmáx	200				
	1000	Vmín	720	0,50	0,89	0,89	0%
		Vmáx	360				
	2000	Vmín	3,08	0,38	0,79	0,77	2%
		Vmáx	1,16				
	4000	Vmín	1280	1,14	1,00	0,5	47%
		Vmáx	1460				

Tabla 2: Resultados obtenidos en las mediciones a diferentes frecuencias.

2.4 Resultados

En base a los cálculos descritos anteriormente con cada una de las frecuencias para las que el aparato de onda estacionaria se ha diseñado, se obtienen los resultados que se muestran en las tablas 3, 4 y 5, para cada tipo de probeta ensayada. Se representa, para ambos casos, el coeficiente de absorción de cada material en función de la frecuencia (ver figuras 10,11 y 12).

El primer ensayo que se efectúa es con el núcleo en ausencia de chapa (tabla 3, figura 10). En los resultados obtenidos se observa que el material que mejor se comporta en esta situación es el núcleo de FireMaster, con un coeficiente de absorción del 100% para 500 y 1000 Hz y 96% para 2000 Hz. Por otra parte, el material que peor se comporta es la Lana de Roca mostrando unos resultados algo inferiores a los demás

núcleos. No obstante, de todas formas, los resultados obtenidos son favorables ya que todos ellos absorben más del 96% de la onda incidente.

NÚCLEO DESNUDO												
Muestra	Frecuencia (Hz)	Voltaje (mV)		Distancia y1 (m)	n	α	r	λ	Y2	Δ	Re	Im
FireMaster	500	V _{min}	340	0,037	1,06	1,00	0,03	0,87	0,47	-2,61	0,95	-0,03
		V _{máx}	360									
	1000	V _{min}	440	0,0362	1,05	1,00	0,02	0,43	0,25	-2,09	0,98	-0,04
		V _{máx}	460									
	2000	V _{min}	616	0,0332	0,66	0,96	0,21	0,22	0,14	-1,22	1,06	-0,43
		V _{máx}	404									
Airex	500	V _{min}	388	0,0365	0,81	0,99	0,10	0,87	0,47	-2,61	0,83	-0,09
		V _{máx}	316									
	1000	V _{min}	496	0,031	0,79	0,99	0,12	0,43	0,25	-2,24	0,85	-0,16
		V _{máx}	392									
	2000	V _{min}	616	0,0331	0,66	0,96	0,21	0,22	0,14	-1,23	1,06	-0,43
		V _{máx}	404									
Lana de Roca	500	V _{min}	476	0,0376	0,85	0,99	0,08	0,87	0,47	-2,60	0,87	-0,07
		V _{máx}	404									
	1000	V _{min}	616	0,0365	0,66	0,96	0,21	0,43	0,25	-2,09	0,77	-0,29
		V _{máx}	404									
	2000	V _{min}	616	0,0382	0,66	0,96	0,21	0,22	0,15	-0,93	1,20	-0,42
		V _{máx}	404									
Fibra Cerámica	500	V _{min}	316	0,0387	0,95	1,00	0,03	0,87	0,47	-2,58	0,96	-0,03
		V _{máx}	300									
	1000	V _{min}	616	0,0354	0,66	0,96	0,21	0,43	0,25	-2,12	0,76	-0,28
		V _{máx}	404									
	2000	V _{min}	616	0,0346	0,66	0,96	0,21	0,22	0,14	-1,14	1,10	-0,43
		V _{máx}	404									

Tabla 3: Resultados coeficiente de absorción, núcleo desnudo.

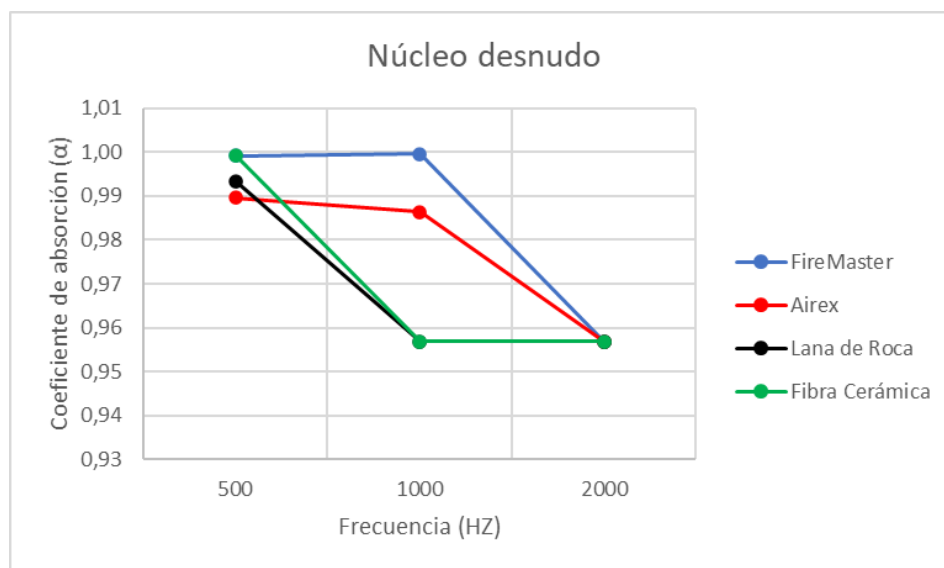


Figura 10: Representación gráfica de los resultados, núcleo desnudo.

En segundo lugar, se realizaron las mediciones para el núcleo acompañado de una chapa, en los que los resultados obtenidos son muy favorables para el Airex, la Fibra Cerámica y la Lana de Roca, los cuales obtuvieron prácticamente los mismos resultados, mientras que el FireMaster obtuvo unos resultados muy por debajo a los demás materiales.

NÚCLEO CON UNA CHAPA												
Muestra	Frecuencia (Hz)	Voltaje (mV)		Distancia y1 (m)	n	α	r	λ	Y2	Δ	Re	Im
FireMaster	500	Vmín	440	0,0268	0,45	0,86	0,38	0,87	0,46	-2,75	0,47	-0,15
		Vmáx	200									
	1000	Vmín	720	0,0245	0,50	0,89	0,33	0,43	0,24	-2,43	0,55	-0,27
		Vmáx	360									
	2000	Vmín	308	0,0328	0,38	0,79	0,45	0,22	0,14	-1,24	0,87	-0,94
		Vmáx	116									
Airex	500	Vmín	576	0,038	0,69	0,97	0,19	0,87	0,47	-2,59	0,72	-0,14
		Vmáx	396									
	1000	Vmín	616	0,0356	0,66	0,96	0,21	0,43	0,25	-2,11	0,76	-0,28
		Vmáx	404									
	2000	Vmín	616	0,0382	0,66	0,96	0,21	0,22	0,15	-0,93	1,20	-0,42
		Vmáx	404									
Lana de Roca	500	Vmín	540	0,038	0,73	0,98	0,15	0,87	0,47	-2,59	0,76	-0,13
		Vmáx	396									
	1000	Vmín	616	0,0291	0,66	0,96	0,21	0,43	0,25	-2,30	0,72	-0,23
		Vmáx	404									
	2000	Vmín	616	0,0328	0,66	0,96	0,21	0,22	0,14	-1,24	1,05	-0,43
		Vmáx	404									
Fibra Cerámica	500	Vmín	364	0,0326	0,91	1,00	0,05	0,87	0,47	-2,67	0,92	-0,04
		Vmáx	332									
	1000	Vmín	564	0,0275	0,72	0,97	0,17	0,43	0,24	-2,35	0,77	-0,19
		Vmáx	404									
	2000	Vmín	616	0,0305	0,66	0,96	0,21	0,22	0,14	-1,38	0,99	-0,42
		Vmáx	404									

Tabla 4: Resultados coeficiente de absorción, núcleo con una chapa.

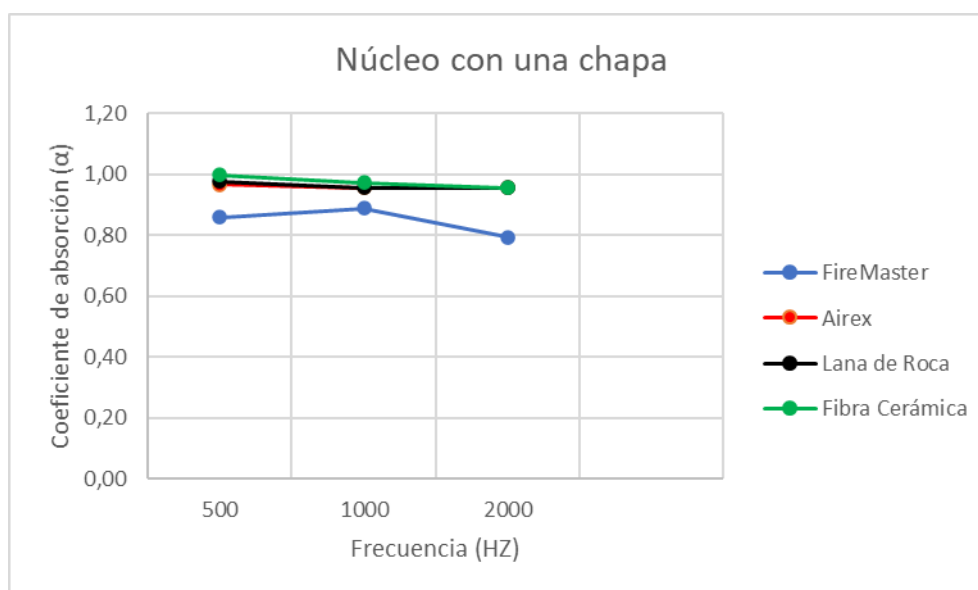


Figura 11: Representación gráfica de los resultados, núcleo con una chapa.

Por último, se realizó el ensayo de la probeta formada por chapa, núcleo y chapa. Esta probeta simula el mamparo de un barco, por ello, los resultados obtenidos son los que más se ajustan a una situación real. En la figura 12 se puede ver que los resultados son más dispares, resultando más complicado seleccionar un material, ya que ninguno destaca de manera notable por encima de los demás. Si es cierto, que la Fibra Cerámica es el único que no presenta grandes variaciones, absorbiendo entre un 98 y 96% de la onda, mientras que los demás proporcionan menos estabilidad.

MAMPARO																					
Muestra	Frecuencia (Hz)	Voltaje (mV)		Distancia y1 (m)	n	α	r	λ	Y2	Δ	Re	Im									
FireMaster	500	V _{mín}	288	0,295	0,94	1,00	0,03	0,87	0,73	1,13	1,02	0,05									
		V _{máx}	272																		
	1000	V _{mín}	616										0,0352	0,66	0,96	0,21	0,43	0,25	-2,12	0,76	-0,28
		V _{máx}	404																		
	2000	V _{mín}	616										0,0347	0,66	0,96	0,21	0,22	0,14	-1,13	1,10	-0,43
		V _{máx}	404																		
Airex	500	V _{mín}	504	0,0377	0,75	0,98	0,14	0,87	0,47	-2,60	0,78	-0,12									
		V _{máx}	380																		
	1000	V _{mín}	616										0,0354	0,66	0,96	0,21	0,43	0,25	-2,12	0,76	-0,28
		V _{máx}	404																		
	2000	V _{mín}	616										0,0383	0,66	0,96	0,21	0,22	0,15	-0,93	1,21	-0,42
		V _{máx}	404																		
Lana de Roca	500	V _{mín}	396	0,0375	0,88	1,00	0,06	0,87	0,47	-2,60	0,89	-0,06									
		V _{máx}	348																		
	1000	V _{mín}	616										0,0381	0,66	0,96	0,21	0,43	0,26	-2,04	0,78	-0,30
		V _{máx}	404																		
	2000	V _{mín}	616										0,0336	0,66	0,96	0,21	0,22	0,14	-1,20	1,07	-0,43
		V _{máx}	404																		
Fibra Cerámica	500	V _{mín}	356	0,0347	0,74	0,98	0,15	0,87	0,47	-2,64	0,76	-0,11									
		V _{máx}	264																		
	1000	V _{mín}	580										0,038	0,70	0,97	0,18	0,43	0,26	-2,04	0,81	-0,27
		V _{máx}	404																		
	2000	V _{mín}	616										0,0364	0,66	0,96	0,21	0,22	0,14	-1,04	1,15	-0,43
		V _{máx}	404																		

Tabla 5: Resultados coeficiente de absorción, mamparo.

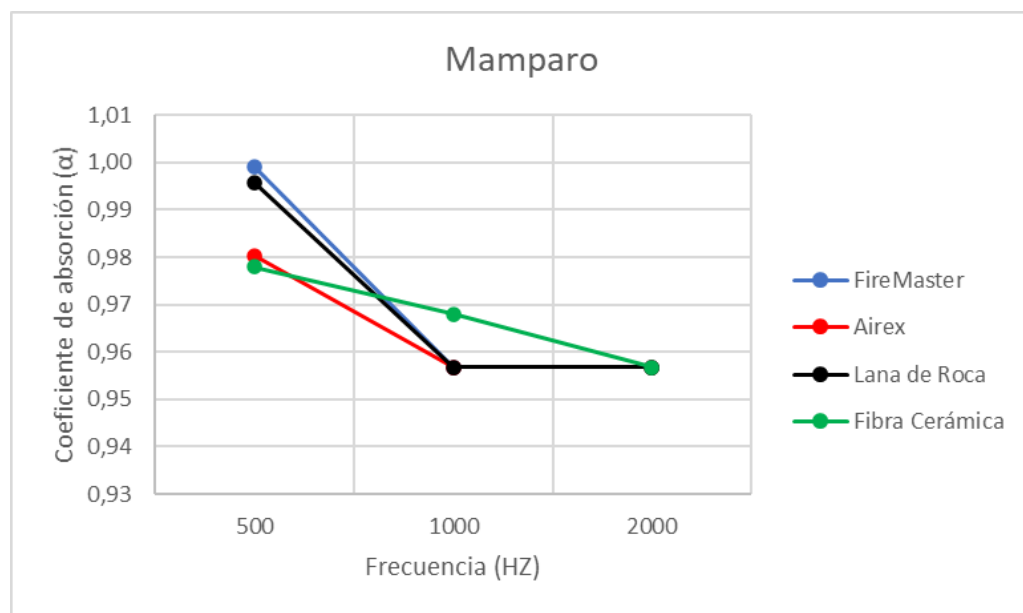


Figura 12: Representación gráfica de los resultados, mamparo.

Para lograr un resultado más esclarecedor se realiza la media de cada material para las diferentes frecuencias a las que fue analizado. De esta manera se consigue un solo coeficiente de absorción por frecuencia y material, facilitando el análisis de los mamparos según el material del núcleo.

		NÚCLEO DESNUDO	NÚCLEO CON UNA CHAPA	MAMPARO	Media
FireMaster	500	1,00	0,86	1,00	0,95
	1000	1,00	0,89	0,96	0,95
	2000	0,96	0,79	0,96	0,90
Airex	500	0,99	0,98	0,97	0,98
	1000	0,99	0,96	0,96	0,97
	2000	0,96	0,96	0,96	0,96
Lana de Roca	500	0,99	0,98	1,00	0,99
	1000	0,96	0,96	0,96	0,96
	2000	0,96	0,96	0,96	0,96
Fibra Cerámica	500	1,00	1,00	0,98	0,99
	1000	0,96	0,97	0,97	0,97
	2000	0,96	0,96	0,96	0,96

Tabla 6: comparación de resultados.

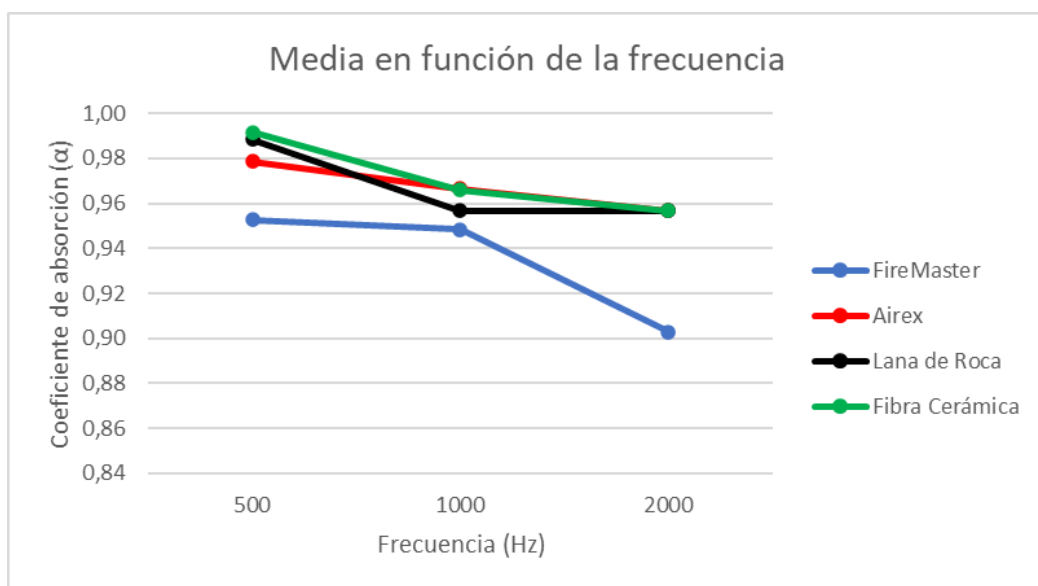


Fig. 13: Representación gráfica de la comparación de resultados.

Con la finalidad de analizar la bondad de un aislante acústico resulta mucho más práctico y visual centrarse en el coeficiente de absorción y no en la impedancia acústica. No resulta extraño que en la figura 13 el material que muestra un mayor coeficiente de absorción, a las frecuencias analizadas, sea la Fibra cerámica. Este se debe a que, en el análisis individual de cada tipo de probeta, destaca la configuración con una chapa y con dos, mientras que las otras configuraciones muestran coeficientes de absorción buenos. Cuando se define bueno se refiere a que están por encima del 78% de absorción. No obstante, se encuentran por debajo del coeficiente de absorción de la Fibra Cerámica.

3 ESTUDIO TÉRMICO

Al someter los materiales a altas temperaturas se produce una transferencia de energía en forma de calor al material, provocando un aumento de temperatura e incluso puede dar lugar a cambios físico - químicos en el material que modifican su estructura [9].

Cuando se trabaja con materiales, dos de los aspectos más importantes a analizar son su estabilidad térmica, es decir, como se comporta frente a la temperatura, y la caracterización de las transiciones que va a experimentar [9]. El estudio térmico abarca al grupo de técnicas en las que se mide una propiedad física de un sistema (sustancia o materia) en función de la temperatura sometiéndolas a un programa de temperatura controlado. Existen más de una docena de métodos térmicos que difieren en las propiedades medidas y en los programas utilizados que dan como resultado una curva de análisis térmico a partir de la cual se analiza cómo ha cambiado la muestra durante el ensayo [10].

Las técnicas utilizadas se clasifican dependiendo de la magnitud física que se mide durante el ensayo. En este estudio se realizan dos ensayos diferentes, un ensayo termogravimétrico (TGA) y un ensayo al fuego.

3.1 Ensayo Termogravimétrico (TGA)

Al someter una muestra a un proceso de calentamiento esta sufre transformaciones físico-químicas que se representan mediante variaciones en la masa total de la muestra [9]. En el estudio termogravimétrico se registra de manera continua, la masa de una muestra colocada en una atmósfera controlada. Este control se puede hacer o en función de la temperatura (experimento dinámico), o en función del tiempo (experimento isoterma) [10].

En el experimento dinámico la temperatura de la muestra va aumentando de forma lineal con el tiempo mientras que en el experimento isoterma la temperatura permanece constante durante todo el experimento.

3.1.1 Base teórica

En este caso, el ensayo termogravimétrico se encarga de medir la variación de masa porcentual que sufre el material tras ser sometido a una rampa de calentamiento controlada (experimento dinámico) [9].

De este ensayo se obtiene una curva del análisis térmico en el cual se representa la pérdida de masa que sufre el núcleo frente al aumento de la temperatura. Este

experimento se realiza en un horno en el cual se produce el calentamiento controlado mediante una rampa de temperatura previamente programada. En el interior del horno se encuentran dos portamuestras en los cuales se apoyarán las cápsulas [11]. Una de las cápsulas es la de referencia y en la otra se deposita la muestra del material a analizar. Ambas están sobre una microbalanza, que es la encargada de medir y registrar la variación de peso de la muestra en todo momento.

El objetivo de este ensayo es analizar la estabilidad térmica de los materiales midiendo su degradación. Para la realización del ensayo termogravimétrico el equipo que se emplea es un medidor simultáneo DSC-TGA modelo SDT-2960 de *TA instruments* como el que se observa en la figura 14.



Figura 14: TA instruments sdt-2960 simultaneous DSC-TGA [12].

En la figura 15 se muestra un esquema de la máquina. El sistema se basa en un diseño horizontal de doble haz que admite mediciones DSC y TGA. El horno de bobinado bifilar proporciona un calentamiento controlado, uniforme de hasta 1500°C. Todo el conjunto del horno opera en un tornillo accionado por motor para permitir apertura y cierre automáticos.

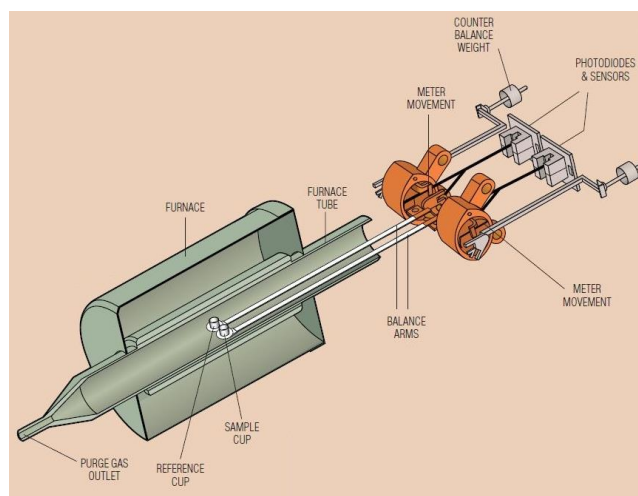


Figura 15: Esquema SDT-2960 [12].

En el extremo se puede observar la salida del aire de purga que se inyecta al horno con un caudal de 100 ml/min, aunque puede llegar a inyectarse 1000 ml/min para purgar más rápidamente.

El ensayo termogravimétrico se puede realizar a diferentes atmósferas, en este caso se usa aire con un caudal de 100ml/min que se regula gracias al sistema de regulación de gas que se observa en la figura 16.

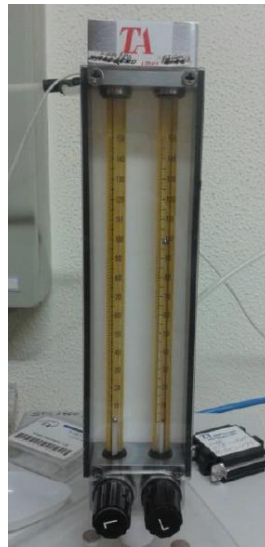


Figura 16: Sistema de regulación de gas.

En la figura 17 se muestra una balanza analítica mediante la cual se pesará la muestra ya depositada en la cápsula antes de introducirla en el horno, de esta manera podemos añadir o quitar muestra de la cápsula sin descalibrar la balanza que está unida a los portamuestras del horno.

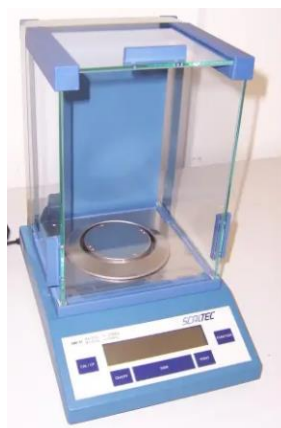


Figura 17: Balanza analítica

Situado al lado de la máquina de TA se dispone un ordenador mediante el cual se programa la máquina según el ensayo que se desee realizar a través del software *Advantega*. Esta pantalla tiene una doble función, aparte de ser el medio mediante el

cual se programa la máquina, también es el medio mediante el cual se muestran los resultados obtenidos del experimento gracias al software TA *Universal Analysis*.

De este ensayo se obtienen las curvas TGA, que muestran gráficamente la pérdida de peso de que sufren las muestras durante el calentamiento. Dentro de los procesos que pueden tener lugar, se encuentran reacciones químicas como descomposición, combustión, evaporación, sublimación o desecación.

En la figura 18 se muestran los principales tipos de curvas termogravimétricas que se pueden obtener durante estos ensayos. En la primera curva se puede ver que es prácticamente una línea recta, esto indica que no se ha producido descomposición con pérdida de productos y, por tanto, tampoco se produce pérdida de peso. A parte de eso, también indica que la muestra no varía con la temperatura [13].

Sin embargo, puede ocurrir que ocurran otro tipo de reacciones como una transición de fase, fundido o una polimerización que no se detectan con este tipo de ensayos [14].

En la segunda curva, se produce una pérdida de masa al inicio y después se estabiliza sin sufrir ninguna degradación más. Este proceso de pérdida de peso inicial y una posterior estabilización es característico de un proceso de secado o desorción.

La curva número tres representa un proceso de degradación térmica simple. En esta curva es fácil definir los límites de temperatura para los que la muestra es estable y para los que la muestra sufre degradación.

En la cuarta se produce una descomposición multietapa con zonas de degradación y zonas estables. La quinta es igual que la cuarta, pero en este caso, los productos intermedios no son estables.

La curva seis muestra una ganancia de masa como consecuencia de la reacción de la muestra con la atmósfera con la que se está ensayando.

En la última, se aprecia como la reacción de oxidación se produce a temperaturas más elevadas [13].

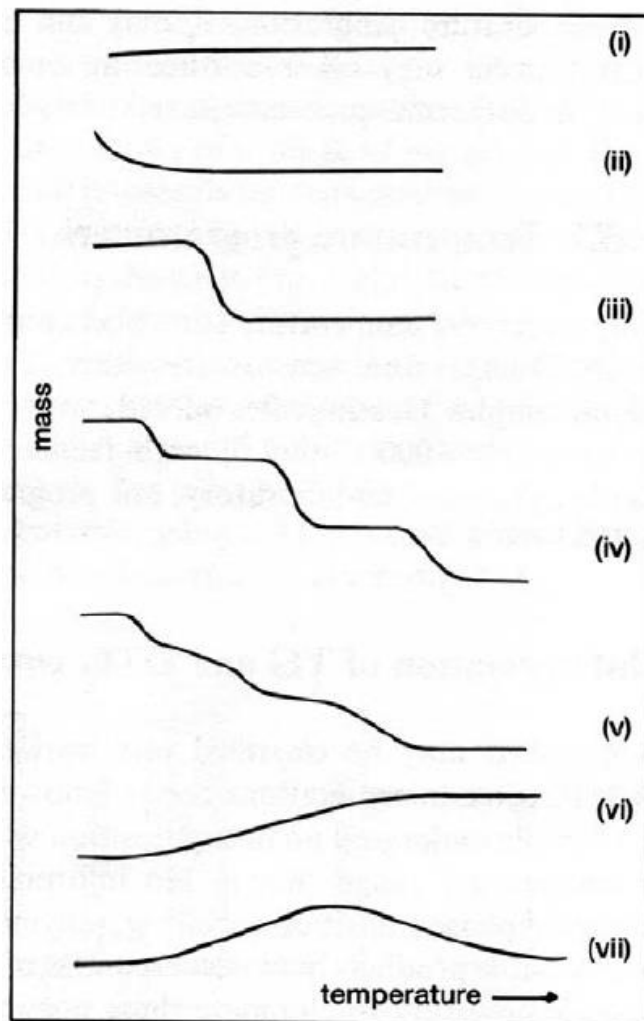


Figura 18: Principales tipos de curvas termogravimétricas [13].

3.1.2 Ensayos

Se ha realizado un ensayo TGA para cada uno de los núcleos a estudiar. Para llevarlo a cabo se programó una rampa de temperatura desde 20°C hasta 1200°C, con una velocidad de calentamiento de 20°C/min.

El ensayo se realizó en atmósfera de aire con un caudal de 100ml/min. Las muestras rondan los 6 o 7 mg ya que, al trabajar con masas pequeñas, los cambios que se pueden producir por la densidad o por el tamaño de la muestra, los cambios que se pueden producir en las mediciones son menores, menos perceptibles que si se trabajara con grades masas con las cuales la fiabilidad de las medidas no está asegurada.

Lo primero que se hace es realizar la calibración del equipo tal y como indica el fabricante. Una vez que se ha calibrado, se procede a programar el ensayo en el software *Advantega*, estableciendo los parámetros de la rampa como se ha indicado en

el apartado anterior y eligiendo la atmósfera en la cual se va a realizar. Posteriormente, se procede a preparar la muestra. Esta no puede sobresalir de la cápsula y no se debe modificar su forma (no se debe aplastar la muestra) por lo se mediante la ayuda de unas pinzas y de una tijera se cortarán pequeños trozos y se introducen en la cápsula para poder pesarla en la balanza analítica.

En el momento en el obtenemos la masa que se ha establecido para la realización del ensayo se introducen las muestras en el horno con mucho cuidado depositándolas cápsulas como se ve en la figura 19 y se comprueba que el peso que indica la microbalanza del equipo de TGA coincide con el peso obtenido en la balanza analítica.



Figura 19: Colocación de las cápsulas en su posición de trabajo [12].

Una vez estén las cápsulas en su posición, se cierra el horno y con el equipo ya programado se empieza el experimento el cual tarda 60min hasta llegar a 1200°C y una vez alcanzada esa temperatura se espera a que la temperatura descienda hasta los 80°C como mínimo para poder abrirlo sin dañar el quipo.El ensayo se puede seguir en tiempo real a través de la pantalla el ordenador.

En el momento en el que ha acabado el experimento, se retiran las cápsulas y se limpian mediante un soplete Dremmel para eliminar los restos que hayan podido quedar y se procede a repetir el mismo procedimiento para la siguiente muestra. Este procedimiento se ha realizado igual para las cuatro muestras a ensayar.

3.1.3 Resultados

En este apartado, se muestran las curvas TG que relacionan la pérdida de peso en función de la temperatura. En la figura 20 se pueden observar los resultados obtenidos en los ensayos realizados donde se ve el comportamiento de cada núcleo a medida que aumenta la temperatura, también se pueden ver las curvas DTG de todos los diferentes materiales.

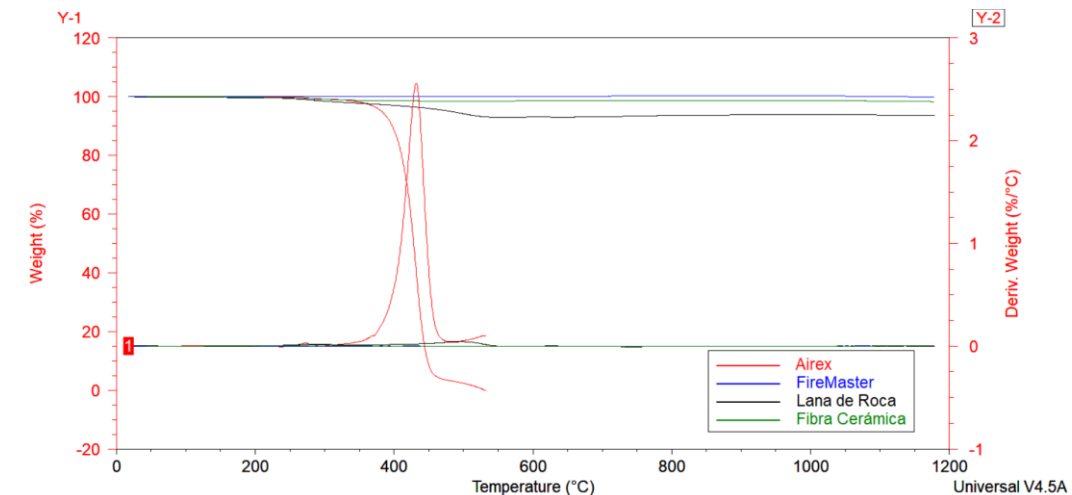


Figura 20: Curvas TG y DTG correspondientes a la descomposición térmica de los núcleos.

A continuación, se procederá a analizar cada núcleo de forma individual:

3.1.3.1 Airex:

En la figura 21 se representan las curvas TG y DTG del Airex. Se observa que hasta los 271°C se produce una pérdida de masa muy pequeña que aumenta un poco hasta alcanzar los 377,42°C. La zona más importante de pérdida de masa corresponde a temperaturas entre 377,42 y 452,06°C en los que se consume el 92,973 % de la masa inicial, quedando sólo el 7,027% de masa, la cual se consume completamente al alcanzar los 531,25°C.

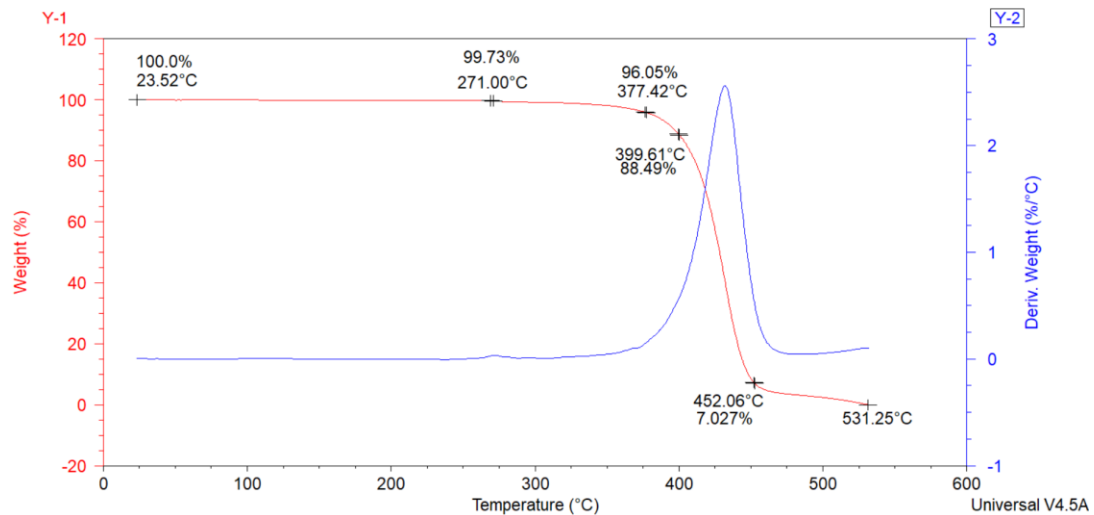


Figura 21: Curvas TG y DTG correspondientes a la descomposición térmica del Airex.

3.1.3.2 FireMaster

En el ensayo del núcleo de FireMaster se observa una ganancia de masa del 0,3% a 902,11°C. Esta ganancia se debe a la reacción de la muestra con la atmósfera que la rodea. Alrededor de los 1000°C se produce una pequeña pérdida de masa hasta los 1200°C, que es la temperatura final del ensayo, en la cual la masa es del 99,82%.

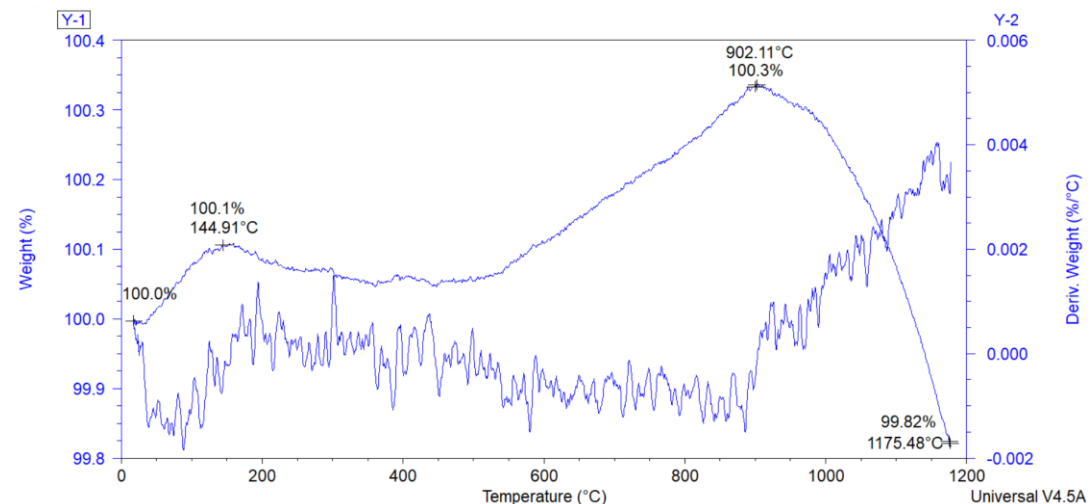


Figura 22: Curvas TG y DTG correspondientes a la descomposición térmica del FireMaster.

3.1.3.3 Fibra cerámica

La Fibra cerámica se descompone un 1,53% desde la temperatura inicial de 20°C hasta alcanzar los 484,50°C, punto en el cual sufre una pequeña ganancia de masa del 0,28% con un pico máximo a 875,89°C. Entre 875,89 y 1200°C ocurre la descomposición del 0,48% de masa, quedando así un 98,27% de la masa final al terminar el ensayo.

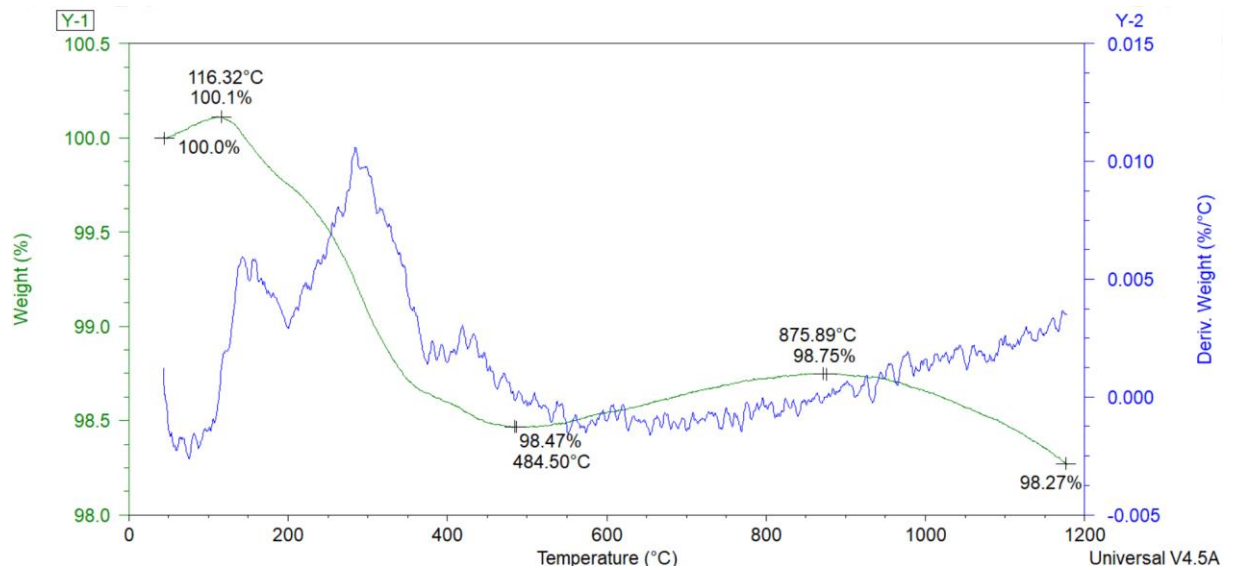


Figura 23: Curvas TG y DTG correspondientes a la descomposición térmica de la Fibra Cerámica.

3.1.3.4 Lana de Roca

El estudio termogravimétrico de la lana de roca muestra una pérdida de masa del 7,02% entre los 20°C iniciales y los 543,1°C, a partir de los cuales se produce una ganancia de 0,7% hasta la temperatura final del ensayo que son los 1200°C.

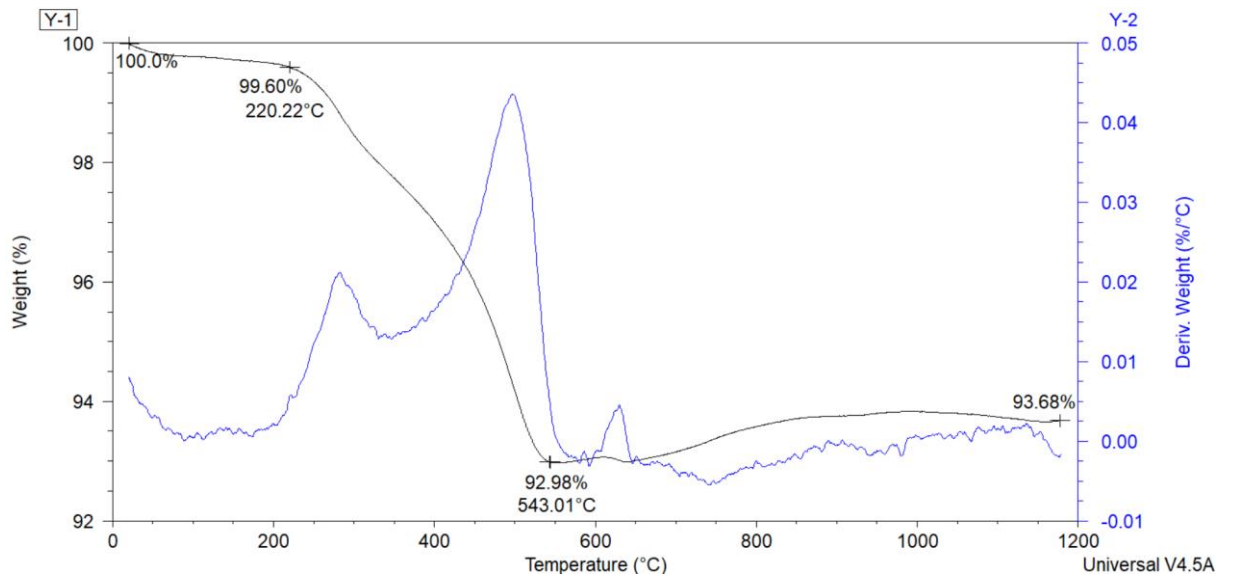


Figura 24: Curvas TG y DTG correspondientes a la descomposición térmica de la Lana de Roca.

3.2 Ensayo de propagación al fuego

Los paneles sándwich normalmente están compuestos por láminas de acero pagadas a cada lado de una lámina de un material aislante. Cada vez son más populares y están sustituyendo a material como ladrillo y hormigón.

El uso de paneles sándwich como materiales para paredes o techos proporciona una rápida construcción y un aislamiento térmico excelente.

Para garantizar la seguridad de las vidas, la protección de la propiedad en la que se instalan estos mamparos y la protección del medio ambiente, los paneles deben ser resistentes al fuego [15]. El fuego es una gran amenaza para los paneles sándwich. Sin la protección adecuada contra incendios los paneles pueden quemarse liberando grandes cantidades de calor, humo y vapores tóxicos [16].

3.2.1 Base teórica

En el caso concreto del sector naval la resistencia al fuego es un factor crítico en las estructuras tipo sándwich [17]. Ya que los materiales del núcleo tienden a degradarse rápidamente cuando se exponen al fuego. Por ello se establece que los mamparos no serán las fuentes de fuego, es decir, serán lo suficientemente resistentes al fuego para no ser una fuente de combustión espontánea y su ignición se retrasará hasta que la tripulación pueda responder a la fuente de fuego principal [18].

Para ello los mamparos deben responder a los criterios establecidos en el SOLAS, Capítulo ii-2 (Construcción- Prevención, detección y extinción de incendios) [19] gracias al cual se clasificarán los mamparos según su respuesta al fuego. Este convenio determina que:

- *“Divisiones de clase “A”*: las formadas por mamparos y cubiertas que satisfacen los criterios siguientes:
 1. Son de acero u otro material equivalente;
 2. Están convenientemente reforzadas;
 3. Están aislada con materiales incombustibles aprobados, de manera que la temperatura media de la cara no expuesta no suba más de 140°C por encima de la temperatura inicial, y que la temperatura no suba en ningún punto, comprendida cualquier unión que pueda haber, más de 180°C por encima de la temperatura inicial en los intervalos de tiempo indicados a continuación:

clase “A-60”	60 min
clase “A-30”	30 min

clase "A-15"	15 min
clase "A-0"	0 min

4. Están construidas de manera que puedan impedir el paso del humo y de las llamas hasta el final del ensayo normalizado de exposición al fuego de una hora de duración; y
 5. La Administración exigió que se realizara una prueba con un prototipo de mamparo o cubierta de conformidad con lo dispuesto en el Código de Procedimientos de Ensayo de Exposición al Fuego para asegurarse de que satisface las prescripciones anteriores sobre integridad y aumento de la temperatura.
- *Divisiones de clase "B":* las formadas por mamparos y cubiertas que satisfacen los criterios siguientes:
1. Están construidas con materiales incombustibles aprobados y todos los materiales utilizados en su construcción y montaje son incombustibles, si bien podrá autorizarse el empleo de chapas combustibles a condición de que satisfagan otras prescripciones apropiadas del presente capítulo;
 2. Tienen un valor de aislamiento tal que la temperatura media de la cara no expuesta no sube más de 140°C por encima de la temperatura inicial, y la temperatura no sube en ningún punto, comprendida cualquier unión que pueda haber, más de 225°C por encima de la temperatura inicial en los intervalos de tiempo indicados a continuación:

clase "B-15"	15 min
clase "B-0"	0 min

3. Están construidas de manera que impidan el paso de las llamas hasta el final de la primera media hora del ensayo normalizado de exposición al fuego; y
4. La Administración exigió que se realizara una prueba con un prototipo de división de conformidad con lo dispuesto en el Código de Procedimientos de Ensayo de Exposición al Fuego para asegurarse de que satisface las prescripciones anteriores sobre integridad y aumento de la temperatura.

- *Divisiones de clase "C"*: las construidas con materiales incombustibles aprobados. No es necesario que satisfagan las prescripciones relativas al paso del humo y de las llamas ni las limitaciones relativas al aumento de la temperatura. Está autorizado el empleo de chapas combustibles a condición de que éstas satisfagan las prescripciones del presente capítulo."

3.2.2 Prototipo

El objetivo de este ensayo es analizar el comportamiento de los mamparos y su posterior clasificación según su resistencia al fuego. Al igual que en el estudio acústico fue necesario construir las probetas, pero a diferencia del anterior, en este se estudia el mamparo real. Para construir la probeta se cortaron chapas cuadradas de 100x100 mm de acero de 1,5mm. Una vez cortadas se procede a su limpieza.

Para ello se usa un secador de alta temperatura que se dispondrá a 450°C para poder quitarle lo máximo posible los residuos de lana de roca ya que las chapas se obtuvieron de desmontar mamparos que se utilizan actualmente en los buques para así poder diseñar las probetas lo más fieles posible a la realidad.

Cuando se eliminó el exceso de lana de roca de las chapas se retira el adhesivo con el cual viene pegados los mamparos. Para ello se usa acetona pura, la cual se rocía encima de cada chapa y se deja actuar para que el adhesivo se ablande y sea más fácil quitarlo con ayuda de una raqueta, dejando así la chapa totalmente limpia.

Una vez limpias se dejan secar y se recorta el núcleo para cada probeta. Esta metodología se repite 3 veces para cada material por lo que hace un total de 24 chapas y 3 muestras de cada núcleo con el espesor de 50mm. La muestra del mamparo está compuesta de chapa, núcleo y chapa, unidos entre sí mediante un adhesivo termoplástico.

Para poder analizar el comportamiento del mamparo al fuego al fuego se seguirá la norma UNE-EN ISO 1182 [20] para el ensayo de propagación del fuego. El ensayo que se efectúa en este trabajo está conforme a la UNE con ciertas simplificaciones debido a que se han utilizado equipos de fabricación propia. En la norma, se emplea una cámara de propagación de la llama (figura 25), en la que el ensayo se realiza en ausencia de corrientes de aire.

La Escuela Politécnica Superior de Ferrol no dispone de este dispositivo, pero si cuenta con una campana extractora en la que se pueden realizar los ensayos en las mismas condiciones de ausencia de fuego (figura 26). En ella se dispone una bomba de gas butano que junto con un mechero Bunsen son los encargados de simular la situación de incendio. Aparte de evitar corrientes de aire, el dispositivo se instala en la campana

extractora para que en caso de que los mamparos emitan vapores o humos tóxicos, las personas que se encuentren expuestas a ellos no sufran ningún tipo de intoxicación.

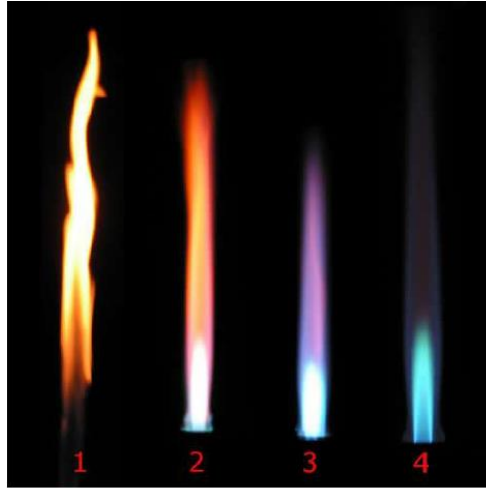


Figura 25: Cámara de propagación de la llama.



Figura 26: Campana Extractora.

La temperatura de un incendio está entre 600 y 1100°C por lo que hay que ajustar el mechero Bunsen de tal manera que la llama ronde esas temperaturas. Como se puede observar en las figuras 27 y 28 hay varios tipos de llama y diferentes temperaturas [21]. Los diferentes tipos de llama se consiguen regulando la entrada de aire mediante la anilla reguladora.



- 1.- Sin entrada de aire. Llama reductora.
- 2.- Poca entrada de aire.
- 3.- Mucha entrada de aire.
- 4.- Máxima entrada de aire. Llama oxidante.

Figura 27: Tipos de llama [21].

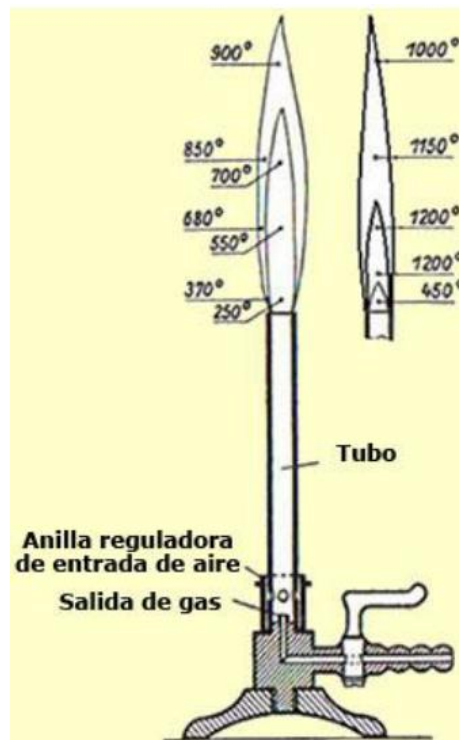


Figura 28: Temperaturas de la llama [21].

Este equipo va acompañado de un porta probetas en donde se apoya la probeta a analizar tal y como se puede ver en la figura 29.



Figura 29: Ensayo al fuego.

Para la obtención de los datos, se dispone de un termómetro digital (figura 30) con el cual se mide la temperatura del mamparo y una cámara termográfica (figura 31) que dejar constancia de cómo se va produciendo la transmisión de calor a través del mamparo. Todos estos datos se analizan gracias a la utilización de del software FLIR Tools que permite analizar al detalle todas la fotografía tomadas con la cámara termográfica.



Figura 30: Termómetro digital.



Figura 31: Cámara termográfica.

3.2.3 Resultados

El ensayo al fuego simula la situación de incendio en un buque, por lo tanto, la temperatura debe estar entre 600 y 1100°C.

Para conseguir que la temperatura de trabajo esté entre ese rango se ajustará la entrada de aire del mechero Bunsen. Además, con el termómetro digital se mide la temperatura que marca en la cara inferior de la muestra que se somete al ensayo justo en el momento en el que se coloca. Si el termómetro indica que la temperatura es mayor a 500°C significa que se encuentra dentro de los rangos indicados.

Se mide la temperatura del mamparo antes de someterlo al fuego y una vez colocada en el porta probetas se mide la temperatura de la probeta cada quince minutos y se toma una fotografía con la cámara termográfica. Este proceso se repite para todas las probetas y se obtienen los siguientes resultados.

El primer material ensayado fue el FireMaster, el cual alcanzó una temperatura media máxima de 44,9°C (tabla 7) a los 60 minutos de exposición al fuego y una temperatura mínima de 20,83°C que corresponde con la temperatura ambiente. Estos datos corresponden con las mediciones tomadas con el termómetro (figura 30) pero en la figura 34, se muestran las fotografías termográficas que se realizaron a las probetas durante el proceso.

Estas fotografías se analizan con el software FLIT Tools como se indica en la figura 32. Este programa proporciona la temperatura máxima y mínima de la zona que previamente el usuario ha seleccionado. De esta manera se obtiene un análisis exhaustivo de todos los mamparos, en los que se puede observar cómo se va transfiriendo el calor a través del núcleo y permite clasificar los mamparos según los requisitos del SOLAS [19].

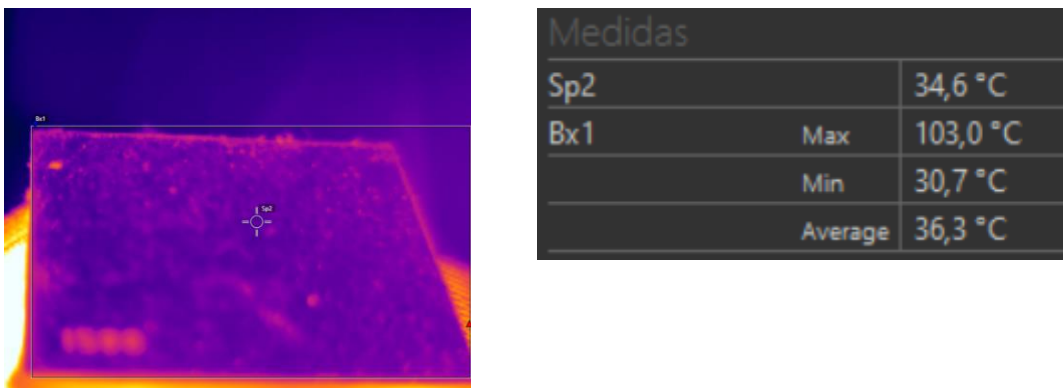


Figura 32: Programa de análisis térmico.

FireMaster						
Medición	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Media	Coef. Variación %	
0'	20,4	20,5	21,6	20,83	3%	
15'	42,2	44	27,6	37,93	24%	
30'	44,2	48,6	31,4	41,40	22%	
45'	45,7	49,8	33,9	43,13	19%	
60'	47,5	51,4	35,8	44,90	18%	

Tabla 7: Mediciones FireMaster ensayo al fuego.

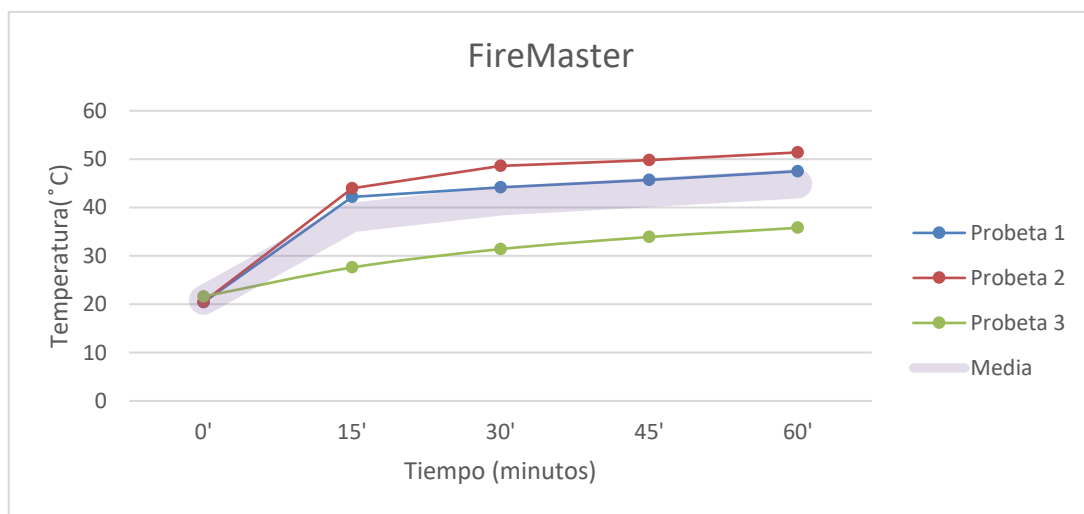


Figura 33: Mediciones FireMaster ensayo al fuego.

En la figura 34 se muestra de forma escalonada en función del tiempo el comportamiento de la muestra observándose que en el instante 0 apenas se produce transmisión de calor. A medida que pasa el tiempo, aumenta la transmisión de calor al igual que lo hace la temperatura en la chapa superior. Tras analizar todas las fotografías de la figura 34, puede concluirse que el mamparo de FireMaster se clasifica como mamparo de clase A. Su temperatura máxima en la cara superior es de 63,5°C tras 60 min de exposición al fuego, mientras que el SOLAS exige que no puede alcanzar los 140°C, cumpliendo así con la normativa vigente.

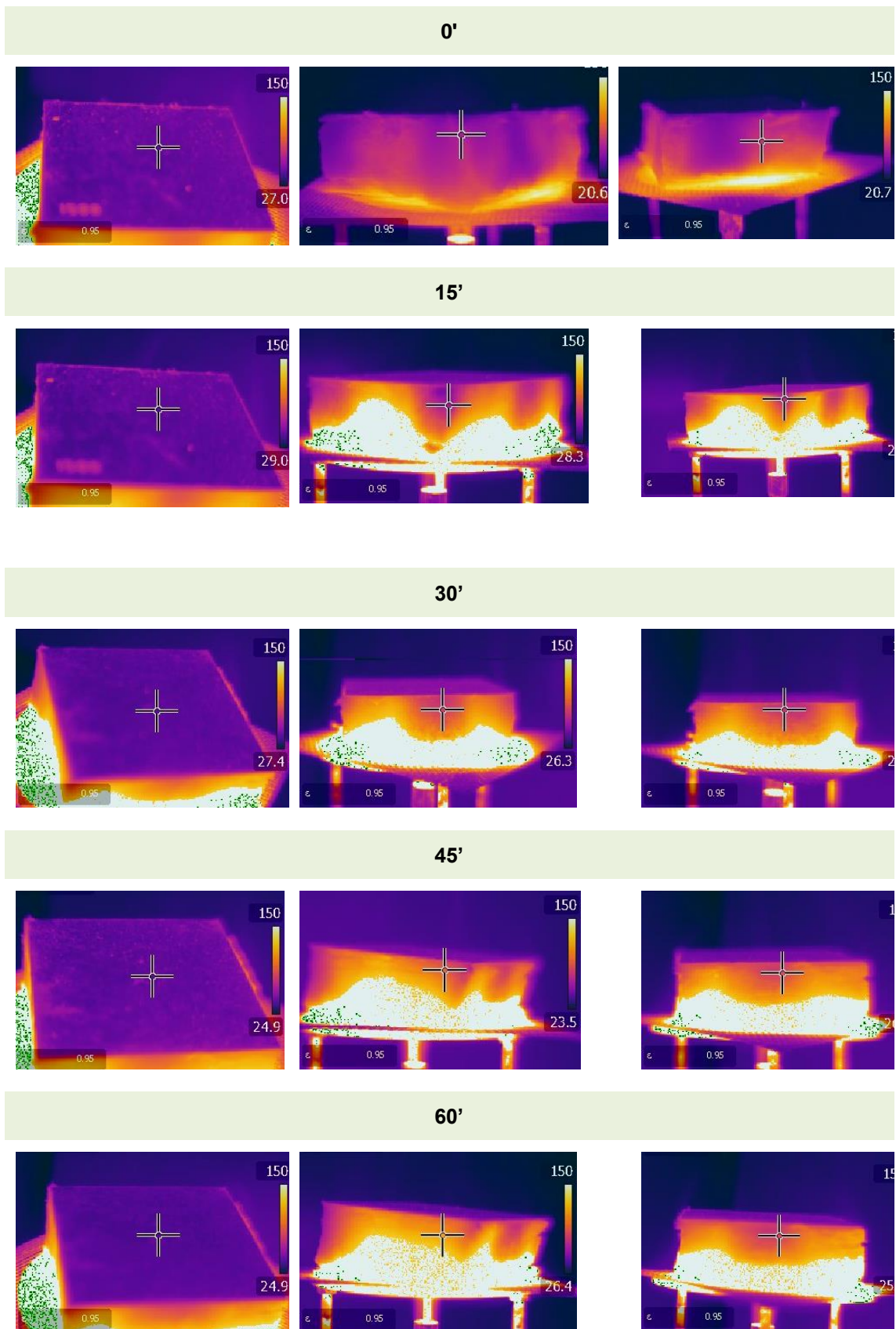


Figura 34: Termografía FireMaster ensayo al fuego.

La Fibra cerámica presentó una temperatura máxima de 55 °C, 10,1°C más que el FireMaster, de todas formas, siguen siendo unos resultados favorables ya que tras realizar el análisis de las fotografías de la figura 36, la cara superior no alcanza los 140°C que indica el SOLAS, clasificándose, así como mamparo de clase A.

Fibra Cerámica						
Medición	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Media	Coef. Variación %	
0'	21,8	21,5	22,1	21,80	1%	
15'	51,6	35,8	47,8	45,07	18%	
30'	58,8	40,3	50,9	50,00	19%	
45'	61,4	44,2	52,3	52,63	16%	
60'	63,5	46,1	55,4	55,00	16%	

Tabla 8: Mediciones Fibra Cerámica ensayo al fuego.

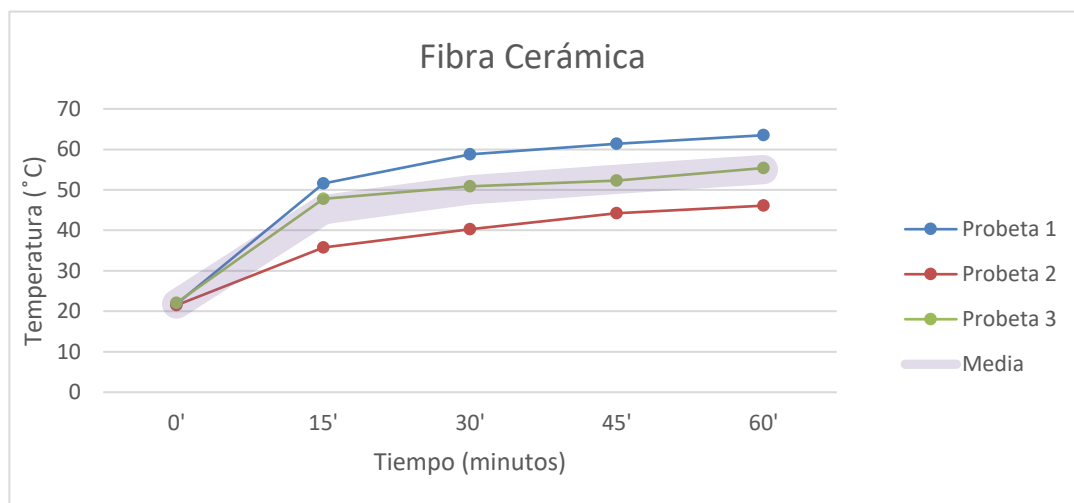


Figura 35: Mediciones Fibra Cerámica ensayo al fuego.

A diferencia de las fotografías que se presentan en la figura 34, en las fotografías de la figura 36 se observa mayor transmisión de calor. Esto puede deberse a las propiedades térmicas del material, pero, también hay que tener en su densidad y que el espesor es mucho menor que los demás núcleos a ensayar

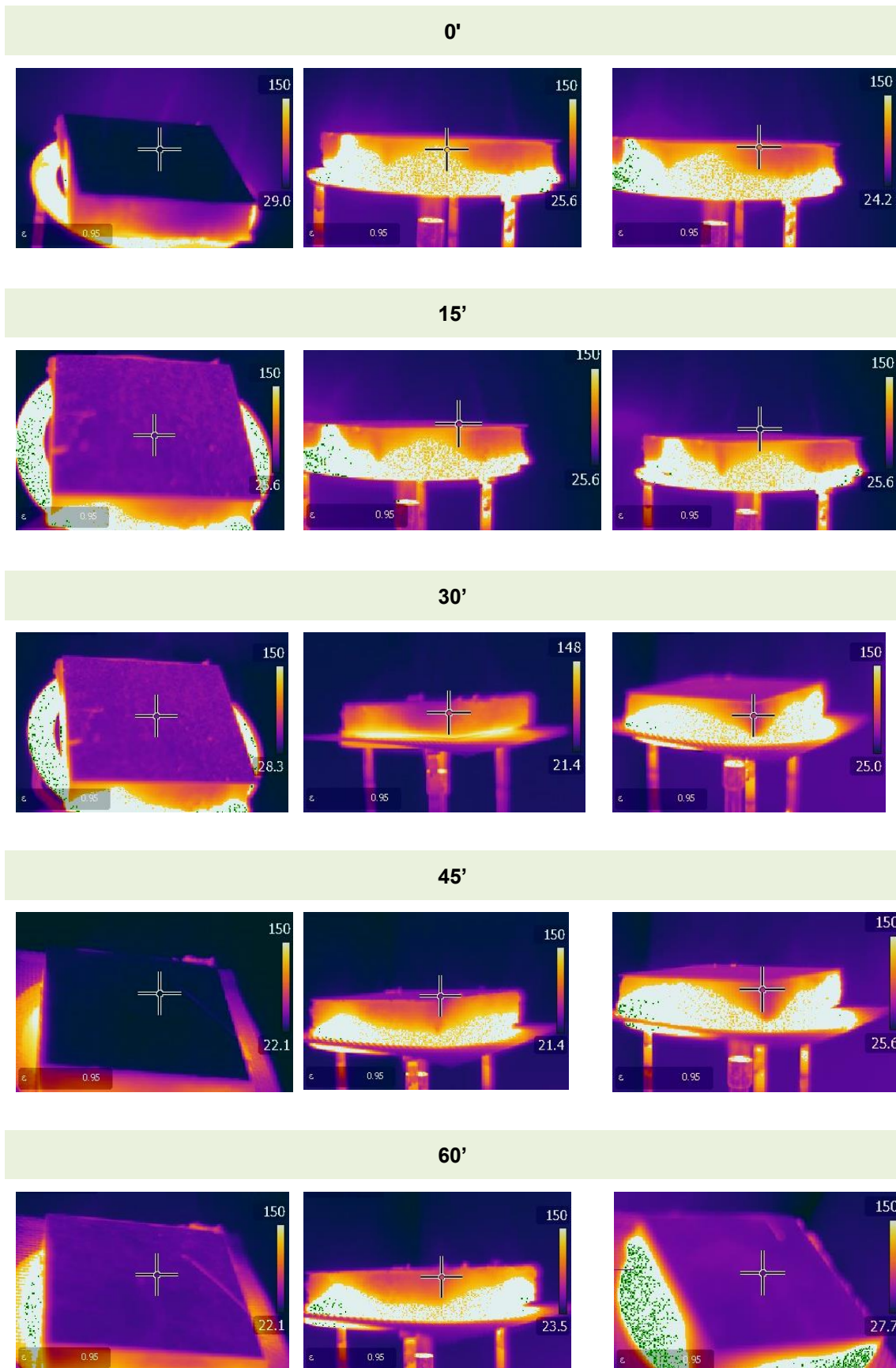


Figura 36: Termografía Fibra Cerámica ensayo al fuego.

A diferencia de los materiales anteriores, la Lana de Roca es el material que menor temperatura alcanza durante el proceso, convirtiéndose así el material que mejor se comporta.

Lana de Roca					
Medición	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Media	Coef. Variación %
0'	21,8	21,7	21,2	21,6	1%
15'	40	42,6	28,6	37,1	20%
30'	38	43,1	34,6	38,6	11%
45'	39,2	44,8	36,2	40,1	11%
60'	41,6	45,7	38,3	41,9	9%

Tabla 9: Mediciones Lana de Roca ensayo al fuego.

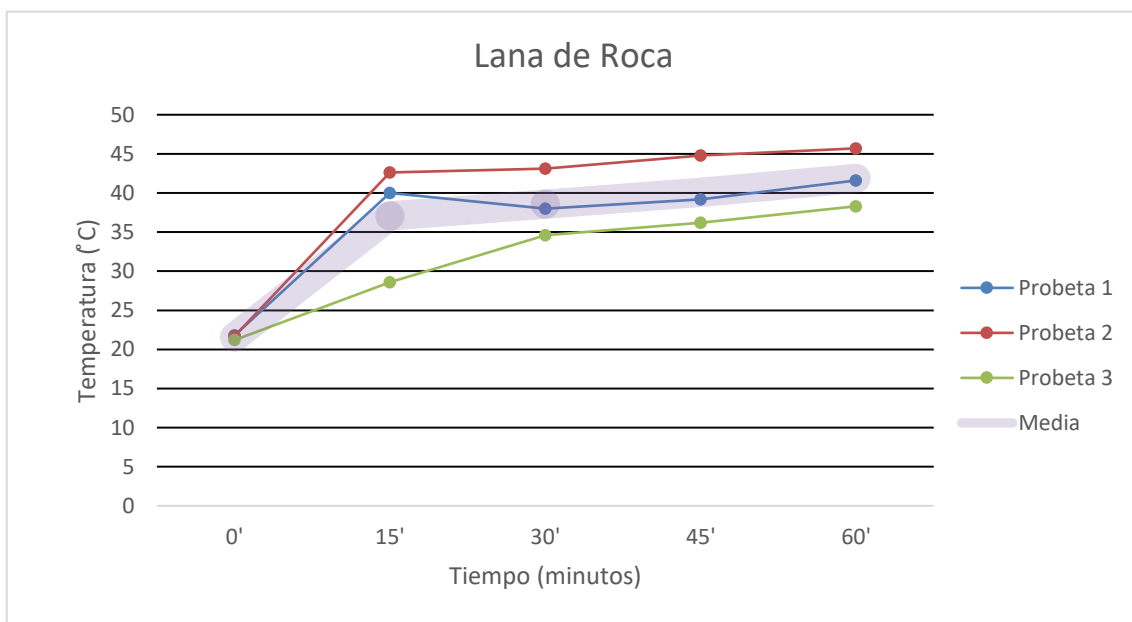


Figura 37: Mediciones Lana de Roca ensayo al fuego.

Pese a que la temperatura registrada es menor que en los casos anteriores, las fotos termogravimétricas indican que la transmisión de calor que se produce en los mamparos de Lana de Roca es mayor que en el caso del FireMaster o de la Fibra cerámica. De todas formas, sigue siendo el mamparo que mejor resultados obtuvo en este ensayo

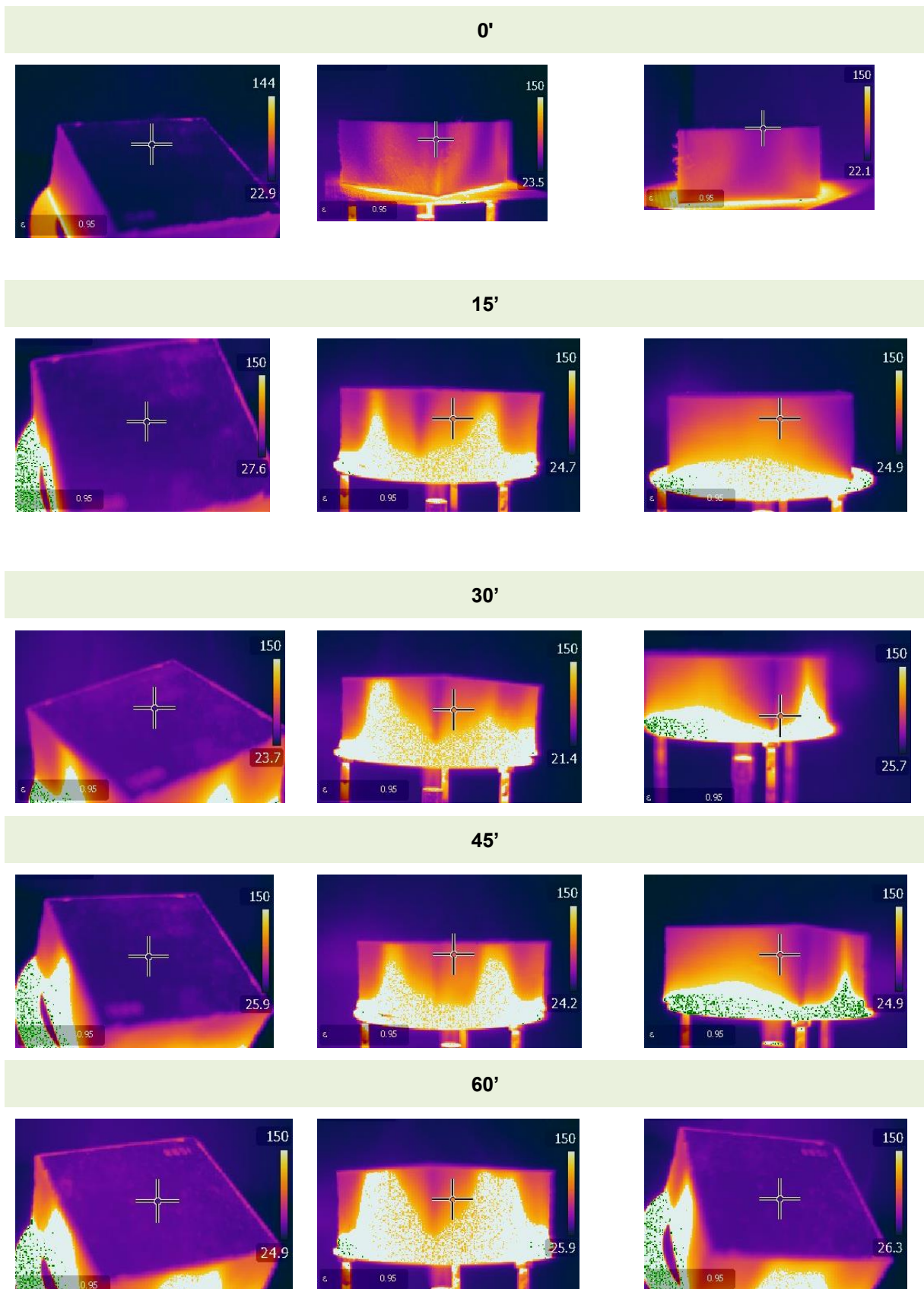


Figura 38: Termografía Lana de Roca ensayo al fuego.

El ensayo de propagación al fuego del Airex no se pudo llevar a cabo ya que al someterlo al fuego comenzó a deshacerse el núcleo y a los 7 min de exposición se produjo una llama en un lateral de la probeta. La chapa que estaba expuesta el fuego se despegó totalmente del núcleo y ambos terminaron como se puede observar en las siguientes fotografías.



Figura 39: Probeta de Airex, ensayo al fuego.

A pesar de que no se pudieron realizar las mediciones de los 3 mamparos de airex el resultado obtenido con 7 min de exposición es más que suficiente ya que demuestra que este panel no soporta el fuego. En un barco sería inviable instalar este tipo de paneles puesto que si se produce un incendio en lugar de actuar como barrera de las llamas este se desharía y empezaría a arder ayudando a la propagación del incendio.

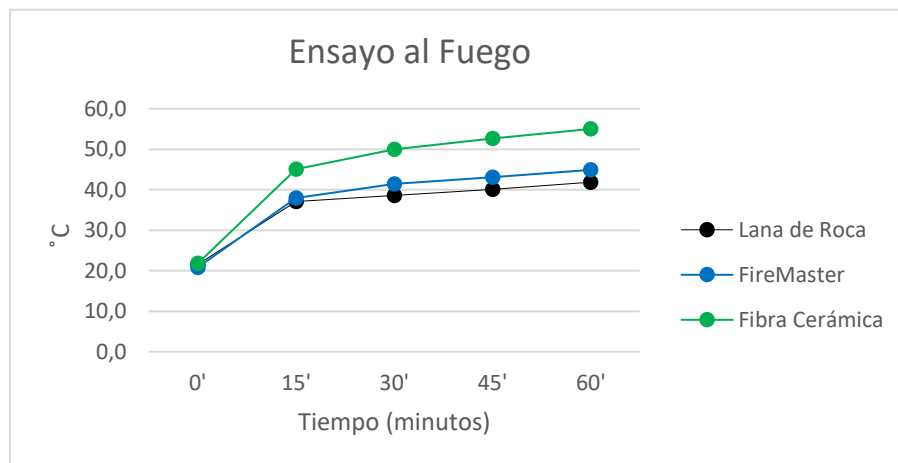


Figura 40: Comparación entre los diferentes núcleos.

La figura 49 compara las temperaturas medias obtenidas para cada material, donde se puede ver que ambos materiales cumplen con el SOLAS pero que el más favorable de todos es la Lana de Roca.

4 CONCLUSIONES

Se han realizado cuatro muestras con cuatro núcleos diferentes de mamparos tipo sándwich a las que se le han efectuado dos estudios. Por una parte, un estudio térmico en el que se observara el comportamiento del mamparo frente a un incendio y, además, cómo actúa el núcleo a altas temperaturas. Por otra parte, se hace un estudio acústico en el que se determina el coeficiente de absorción.

En el estudio acústico el material que peores resultados proporciona es el de FireMaster, obteniendo un coeficiente de absorción muy por debajo de los demás núcleos. Su rango de absorción se encuentra entre el 90% y el 95%, mientras que la Fibra Cerámica resultó ser el material que mejor absorbe la onda incidente, absorbiendo casi el 100%.

Sin embargo, en los procesos de pirólisis para el estudio termogravimétrico, de entre los cuatro núcleos destaca desfavorablemente el Airex ya que es el único que se ha desintegrado por completo, no llegando a alcanzar la temperatura media del ensayo que son los 600°C. El resto de los núcleos responden favorablemente al estudio ya que ninguno de ellos ha llegado a perder un 10% de su masa inicial, entre los cuales se encuentra el FireMaster que sólo ha perdido un 0,18% de su masa.

En cuanto al ensayo de propagación al fuego, como era de esperar tras los resultados obtenidos en el ensayo termogravimétrico, el Airex no superó los 7 primeros minutos de ensayo. Esto implica que su uso como núcleo de panel sándwich queda descartado. En este ensayo el núcleo que mejor se comportó frente al fuego fue la Lana de roca. En cualquier caso, los demás materiales se pueden clasificar como mamparos clase "A", por lo que los tres serían aptos para instalar en un buque.

Estos estudios han permitido realizar un análisis exhaustivo de los paneles tipo sándwich, encontrando la solución a diversos problemas que se planteaban al inicio del proyecto como por ejemplo la reducción del espesor de los mamparos.

Tras comparar los nuevos materiales con la Lana de Roca que es el núcleo que se utiliza actualmente en los paneles sándwich, se puede demostrar que la Fibra Cerámica puede ser un buen sustituto en un futuro. Sus resultados han sido favorables en todos los ensayos, incluso presenta mejores prestaciones que la Lana de Roca en el estudio acústico y en el termogravimétrico.

A pesar de haber obtenido resultados favorables y haber cumplido con el objetivo del proyecto, surge la necesidad de seguir investigando estos materiales y de ir puliendo

fallos que se han podido cometer a lo largo del proyecto. Una de las mejoras a realizar en el siguiente proyecto consistiría en la fabricación del equipo de onda estacionaria para poder abarcar un mayor rango de frecuencias. Además, sería muy interesante desarrollar un modelo matemático que permitiese simular el comportamiento de estos materiales para poder realizar estudios de ciclo de vida, fiabilidad, etc.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en especial a mi tutora, por proponerme este proyecto y guiarme durante todo el proceso. A los profesores de la Universidad de La Coruña, concretamente los que imparten clases en la Escuela Politécnica de Ferrol, por todos estos años de enseñanza y sobre todo a aquellos que me han ayudado en el desarrollo del proyecto, permitiéndome usar sus laboratorios y aportando soluciones cuando se presentaban dificultades.

Muchas gracias a la casa 3ACore Composites Materials y Morgan Advanced Materials por su magnífica atención y por regalarnos los materiales que nos hacían falta para poder llevar a cabo esta investigación.

Por último, me gustaría agradecerles de corazón y dedicarles este trabajo a mi familia y amigos que me acompañaron durante estos cuatro años de carrera, apoyándome y aguantándome en los peores momentos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Villajoyosa, S. H. A. (2021, 10 marzo). Evolución del panel sandwich. Almacén de venta de hierro en Villajoyosa (Alicante), ven a vernos e infórmate. <https://www.hierrosvillajoyosa.es/es/blog/evolucion-del-panel-sandwich/>
- [2] Onboard ship noise: Acoustic comfort in cabins. (2021, 1 junio). ScienceDirect. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003682X21000050>
- [3] UNE EN 29053:1994. Materiales para aplicaciones acústicas. Determinación de la resistencia al flujo del aire. (ISO 9053:1991).
- [4] Ingard K.U., Dear T.A. Measurement of acoustic flow resistance. J.Sound Vib, 103(4), 1985, 567-572.
- [5] UNE EN 10534-1: 1996. Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 1: Método del rango de onda estacionaria.
- [6] Industriales, I., & Trabajo, U. P. M. (2019). MEDIDA, ANÁLISIS Y CONTROL DEL RUIDO INDUSTRIAL Iván Quintana Martínez.
- [7] Del, M., Absorción, C. D. E., & Sonido, D. E. L. (2004). Medición Del Coeficiente De Absorción Del Sonido. Scientia Et Technica, X (25), 101–106. <https://doi.org/10.22517/23447214.7219>
- [8] Colaboradores de Wikipedia. (2021, 13 septiembre). Tubo de Kundt. Wikipedia, la enciclopedia libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Tubo_de_Kundt
- [9] Pickering, W. F. Química analítica moderna; Reverte, 1976
- [10] Madrid, U. P. de. (2010). *MÉTODOS DE ANÁLISIS TÉRMICO 1. Introducción*. 1-32.
- [11] MATTEINI, M.; MOLES, A. Ciencia y restauración; Editorial NERA.

- [12] Dsc-tga, S. (n.d.). SDT 2960 Simultaneous DSC-TGA including DTA capabilities. 1–8.
- [13] Sánchez, L. (2008). Tema 6. Análisis térmico: TG y DTA. Universidad de Córdoba, 2, 23. <http://www.uco.es/~iq2sagrl/TranspATG.pdf>
- [14] Widman, G. Información TA: Interpretación de Curvas TGA; USSER COM, 2001.
- [15] Crewe, R. J., Hidalgo, J. P., Sørensen, M. X., McLaggan, M., Molyneux, S., Welch, S., Jomaas, G., Torero, J. L., Stec, A. A., & Hull, T. R. (2018). Fire Performance of Sandwich Panels in a Modified ISO 13784-1 Small Room Test: The Influence of Increased Fire Load for Different Insulation Materials. *Fire Technology*, 54(4), 819–852. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0703-5>
- [16] Anjang, A., Chevali, V., Lattimer, B., Case, S., Feih, S., & Mouritz, A. (2015). Post-fire mechanical properties of sandwich composite structures. *Composite Structures*, 132, 1019–1028. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.009>
- [17] Anjang, A., Chevali, V., Lattimer, B., Case, S., Feih, S., & Mouritz, A. (2015). Post-fire mechanical properties of sandwich composite structures. *Composite Structures*, 132, 1019–1028. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.07.009>
- [18] DeMarco RA. Composite applications at sea: fire-related issues. *SAMPLE Int Symp* 1991;36;1928-38
- [19] SOLAS, consolidated edition, 2014 : consolidated text of the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, and its Protocol of 1988, articles, annexes and certificates
- [20] UNE-EN ISO 1182:2010. Ensayo de no combustibilidad. (ISO 1182-2010)
- [21] Bernal, R. (2013). Trabajo con vidrio. 2–4. https://riubu.ubu.es/bitstream/handle/10259.3/64/22.0_Trabajo_con_vidrio.pdf;jsessionid=C5A15A7B588334083AD3DF0F1A792C88?sequence=13



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**TRABAJO FIN DE GRADO
CURSO 2020/21**

*ESTUDIO CONCEPTUAL TÉRMICO Y ACÚSTICO DE
MATERIALES PARA USO COMO NÚCLEO DE
MAMPAROS TIPO SÁNDWICH PARA LA
CONSTRUCCIÓN NAVAL*

Grado en Ingeniería Naval y Oceánica

Documento

MEMORIA